

ANALYSE DE LA MARÉE ROUGE MEURTRIÈRE DE 2008 DANS LE
SAINT-LAURENT : ÉVÈNEMENT ISOLÉ OU SYMPTÔME
D'UN DÉVELOPPEMENT NON DURABLE?

par
Sophie Paré

Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de
l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Jean-Marie Bergeron

CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Gatineau, Québec, Canada, 5 décembre 2010

Mots clés : floraison d'algue toxique, *Alexandrium tamarense*, estuaire et golfe du Saint-Laurent, eutrophisation, changements climatiques, gestion intégrée.

SOMMAIRE

Les marées rouges ne sont pas un phénomène nouveau dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Cependant, la floraison toxique d'*Alexandrium tamarense* qui a eu lieu au cours du mois d'août 2008 semble être le premier épisode à connaître une telle ampleur et à avoir un effet aussi dévastateur dans la chaîne alimentaire locale. D'après les experts, des conditions climatiques et océaniques rarement réunies sont à l'origine de ce cas d'exception. Toutefois, peu d'analystes se sont prononcés sur les facteurs qui ont pu influencer ces conditions. S'agit-il d'un pur hasard de la nature ou est-ce plutôt le résultat d'une multitude d'impacts cumulatifs reliés aux activités anthropiques?

L'objectif général de cet essai était donc de déterminer si cette marée rouge est une conséquence des activités humaines non durables et si elle est susceptible de se reproduire. Pour assurer la compréhension approfondie de ce phénomène complexe, les conditions de croissance d'*A. tamarense* ainsi que l'évolution des caractéristiques naturelles et humaines du système du Saint-Laurent furent décrites et analysées. Cette étude a permis de conclure que des activités humaines favorisant des conditions climatiques extrêmes, une augmentation des intrants de nutriments et une perturbation générale de l'équilibre de l'écosystème ont sans doute favorisé la floraison de 2008 et risquent d'accentuer ce problème dans les années à venir. Afin d'éviter un tel scénario, les principes de précaution et de prévention nous commandent de maximiser les efforts pour protéger l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Les actions recommandées portent sur trois domaines interdépendants, soit la prévention à la source, la surveillance, la prévision et l'atténuation des impacts des floraisons, ainsi que la mobilisation du public.

En somme, cette croissance démesurée d'algues en milieu marin peut se comparer aux fleurs d'eau d'algues bleu vert observées dans de nombreux lacs. Il s'agit d'un signal d'alarme, démontrant l'eutrophisation de l'écosystème, c'est-à-dire la détérioration globale de son équilibre et de sa qualité. Le développement des activités humaines dans le bassin versant des Grands Lacs et du Saint-Laurent doit devenir plus durable dans les plus brefs délais. La santé du système Saint-Laurent est d'autant plus importante qu'elle est nécessaire pour assurer la pérennité de plusieurs espèces menacées ainsi que le maintien des ressources utilisées par des millions de Canadiens.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur d'essai monsieur Jean-Marie Bergeron, qui a assuré ce rôle avec brio tout au long de la réalisation de ce projet. Sa grande disponibilité, son intérêt constant et ses judicieux conseils ont été d'une aide très précieuse. Je vous remercie également pour votre grande souplesse et votre compréhension au cours de cette période de transition pour moi, entre la vie d'étudiante et de professionnelle en gestion de l'environnement.

J'aimerais également remercier toutes les personnes-ressources qui m'ont généreusement accordé leur temps et leur expertise au cours d'entretiens forts utiles pour la compréhension de plusieurs facettes de mon sujet, notamment monsieur Éric Darier de Greenpeace Québec, madame Véronik de la Chenelière du Groupe de recherche et d'éducation sur les mammifères marins, madame Véronique Nolet du Réseau d'observation des mammifères marins, madame Lena Measures du ministère des Pêches et Océans Canada, ainsi que monsieur Jean-Pierre Gagné et madame Suzanne Roy de l'Institut des sciences de la mer de Rimouski.

Je ne peux passer sous silence le soutien quotidien de mon cher Simon, qui a su m'offrir une oreille attentive et de longues discussions qui m'ont permis de développer davantage mon esprit critique et mon message. Merci beaucoup.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 PORTRAIT DE LA SITUATION	4
1.1 Description de l'algue <i>Alexandrium tamarense</i>	4
1.1.1 Cycle de vie	4
1.1.2 Conditions de croissance	6
1.1.3 Toxicité	10
1.2 Impacts des marées rouges dans le Saint-Laurent	13
1.2.1 Historique	14
1.2.2 Évènement de 2008.....	15
1.3 Évènements semblables à l'international.....	16
1.3.1 Impacts environnementaux.....	16
1.3.2 Impacts socio-économiques	18
1.3.3 Évolution des cas observés	19
2 DESCRIPTION DE L'ESTUAIRE ET DU GOLFE	20
2.1 Description des caractéristiques naturelles.....	20
2.1.1 Masses d'eau	21
2.1.2 Météorologie.....	30
2.1.3 Bassin versant	33
2.1.4 Écosystème et biodiversité	34
2.2 Description des activités humaines.....	42
2.2.1 Navigation, pêcheries et aquaculture	42
2.2.2 Agriculture et élevage	45
2.2.3 Exploitation des ressources naturelles.....	47
2.2.4 Développements urbains et industriels	48
3 DÉTERMINATION DES CAUSES	53
3.1 Hypothèses sur les causes de la marée rouge de 2008	53
3.1.1 Thèse naturelle	54
3.1.2 Thèse anthropique.....	56
3.1.3 Prise de décision	65
3.2 Hypothèses sur les projections futures	66
3.2.1 Thèse rare	66

3.2.2	Thèse récurrente	67
3.2.3	Prise de décision	67
4	PLAN D'INTERVENTION	69
4.1	Réduction des intrants à la source.....	69
4.1.1	Secteurs commerciaux, industriels, agricoles et ressources naturelles	69
4.1.2	Gouvernements	73
4.1.3	Municipalités et résidents du bassin versant	74
4.2	Surveillance, prévision et atténuation des impacts des floraisons.....	75
4.3	Mobilisation de la population	77
	CONCLUSION.....	78
	RÉFÉRENCES	81
	ANNEXE 1 BIBLIOGRAPHIE.....	87
	ANNEXE 2 CYCLE DE VIE D'ALEXANDRIUM SP.....	101
	ANNEXE 3 MARÉE ROUGE DE 2008	102
	ANNEXE 4 SYSTÈME DU SAINT-LAURENT ET STRATIFICATION ESTIVALE	103
	ANNEXE 5 BATHYMÉTRIE DE L'ESTUAIRE ET DU GOLFE.....	104
	ANNEXE 6 COURANTS DE SURFACE DE L'ATLANTIQUE NORD-OUEST	105
	ANNEXE 7 TEMPÉRATURE ET OXYGÈNE DISSOUS	106
	ANNEXE 8 BASSIN VERSANT DU SAINT-LAURENT	107
	ANNEXE 9 ÉCOSYSTÈME DU GOLFE ET VARIATION DES DÉBARQUEMENTS	108
	ANNEXE 10 VARIATION DU PHYTOPLANCTON DANS L'ESTUAIRE.....	109
	ANNEXE 11 GROUPES TROPHIQUES DES POISSONS DE FOND	110
	ANNEXE 12 SUPERFICIE EN CULTURE ET ENGRAIS UTILISÉS AU QUÉBEC	111
	ANNEXE 13 LIEUX D'ENRICHISSEMENT EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS.....	112
	ANNEXE 14 DENSITÉ HUMAINE AU QUÉBEC.....	113

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Schéma simplifié des conditions de croissance d' <i>A. tamarense</i>	6
------------	--	---

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

AAC	Agriculture et Agroalimentaire Canada
ACIA	Agence canadienne d'inspection des aliments
AMTI	Aquaculture multitrophique intégrée
AOD	Azote organique dissous
BPC	Biphényles polychlorés
CB	Province de la Colombie-Britannique
CLHP	Chromatographie liquide de haute performance
CO ₂	Dioxyde de carbone
COD	Carbone organique dissous
COSEPAC	Comité sur la situation des espèces en péril au Canada
DBO	Demande biologique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane
EC	Environnement Canada
FSC	Forest Stewardship Council
GC	Gouvernement du Canada
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GQ	Gouvernement du Québec
GREMM	Groupe de recherche et d'éducation sur les mammifères marins
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
IML	Institut Maurice-Lamontagne
IPM	Intoxication paralysante par les mollusques
ISMER	Institut des sciences de la mer de Rimouski
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement (Québec)
LEP	Loi sur les espèces en péril (Canada)
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MEQ	Ministère de l'Environnement du Québec
MES	Matières en suspension
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec
MPO	Ministère des Pêches et Océans Canada
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec
MTQ	Ministère des Transports du Québec
N	Azote
NH ₃	Ammoniac

NH ₄	Ammonium
N:P	Ratio de la concentration d'azote par rapport à la concentration de phosphore
N:Si	Ratio de la concentration d'azote par rapport à la concentration de silice
ONA	Oscillation nord-atlantique
P	Phosphore
P:Si	Ratio de la concentration de phosphore par rapport à la concentration de silice
PAN	Programme d'action national du Canada pour la protection du milieu marin contre la pollution due aux activités terrestres
PBDE	Polybromodiphényléthers
PMSSL	Parc marin du Saguenay-Saint-Laurent
ppm	Parties de sel par mille parties d'eau (‰)
PSL	Plan Saint-Laurent
ROMM	Réseau d'observation de mammifères marins
Si	Silice
SLV2000	Saint-Laurent Vision 2000
TBT	Tributylétain
WHOI	Woods Hole Oceanographic Institution
ZIPP	Zones d'intervention prioritaires de phosphore
ZTM	Zone de turbidité maximale

LEXIQUE

Acides fulviques	Ensemble des matières humiques peu polymérisées qui restent en solution à la fois en milieux acide et alcalin.
Acides humiques	Mélange de matières humiques fortement polymérisées qui sont solubles en milieu alcalin, mais qui précipitent par acidification ($\text{pH} < 2$).
Anoxie	Absence d'oxygène dissous dans les eaux profondes.
Autotrophe	Se dit d'un organisme capable d'assurer sa nutrition carbonée à partir du gaz carbonique de l'air grâce à la chlorophylle qu'il contient et au mécanisme de la photosynthèse.
Azote réactif	Azote sous la forme chimique capable de stimuler la croissance des plantes.
Bassin versant	Territoire dont les eaux se déversent vers un lieu donné.
Benthos	Organismes fixes ou mobiles qui vivent sur le fond de l'eau (organismes benthiques).
Bioaccumulation	Accumulation d'une substance dans un organisme vivant, à des concentrations parfois supérieures à celles auxquelles elles se rencontrent dans le milieu dans lequel cet organisme évolue.
Bioamplification	Rétention d'une substance dans les tissus à des teneurs de plus en plus élevées au fur et à mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie des organismes d'une chaîne alimentaire.
Conchyliculture	Élevage de coquillages.
Euphotique	Se dit de la couche la plus superficielle des lacs et des océans, dans laquelle la lumière solaire pénètre et où ont lieu les processus de photosynthèse.
Eutrophisation	Enrichissement des eaux par des nutriments, se traduisant notamment par une prolifération des végétaux aquatiques ou des cyanobactéries et par une diminution de la teneur en oxygène des eaux profondes.
Évaporation	Phénomène qui permet à l'eau sous forme liquide de se transformer en vapeur d'eau vers la phase gazeuse. Ce phénomène est influencé par la température et le vent.
Évapotranspiration	Remise en vapeur d'eau dans l'atmosphère de l'eau que les plantes pompent du sol par leurs racines. Se fait principalement par le feuillage.
Fleur d'eau	Accumulation massive de plancton dans une masse d'eau. Les synonymes efflorescence et floraison sont aussi utilisés.
Gélifraction	Fragmentation d'une roche causée par la pression de l'eau qui gèle dans les fractures et les interstices du matériau.

Global	Dans le domaine de la protection de l'environnement, le terme « global » désigne de très grandes distances à la grandeur de la planète.
Hétérotrophe	Organisme qui dépend des substances organiques du milieu ambiant pour son alimentation et sa croissance.
Hypoxie	Diminution de l'oxygène dissous dans les eaux profondes.
Humine	Partie de l'humus qui est insoluble.
Humus	Ensemble des résidus végétaux et animaux plus ou moins décomposés à la surface du sol forestier.
Hydrophobe	Qui repousse l'eau, l'absorbe ou s'y dissout difficilement.
Ichtyoplancton	Oeufs et larves de poissons en suspension dans l'eau.
Installation septique	Système autonome d'épuration des eaux usées, composé d'une fosse septique et d'un élément épurateur.
Macrozooplancton	Organismes zooplanctoniques visibles à l'œil nu.
Mérozooplancton	Organismes benthiques en phase larvaire qui passent le début de leur vie dans le plancton.
Mésozooplancton	Organismes zooplanctoniques de taille comprise entre 0,2 et 2 mm.
Microzooplancton	Organismes zooplanctoniques invisibles à l'œil nu.
Mixotrophie	Qualifie les organismes pratiquant à la fois autotrophie et hétérotrophie.
Mytiliculture	Élevage de moules.
Nanoplancton	Ensemble des organismes de dimension microscopique (inférieurs à 20 µm) qui flottent plus ou moins passivement dans les eaux marines ou lacustres.
Nanotechnologie	Domaine multidisciplinaire qui concerne la conception et la fabrication, à l'échelle des atomes et des molécules, de structures moléculaires qui comportent une dimension mesurant entre 1 et 100 nanomètres.
Necton	Organismes aptes à se déplacer activement dans la colonne d'eau, malgré les courants (organismes nectoniques).
Nitrate	Composé comprenant un ou plusieurs groupes NO ₃ .
Nutriments	Composés nutritifs qui favorisent le développement de la production primaire.
Oligotrophe	Se dit d'un milieu pauvre en substances nutritives.
Pélagique	Qualifie ce qui se trouve ou se produit en pleine eau, loin du fond et des rivages.

Phagocytose	Adhésion de particules de diamètre microscopique inertes ou vivantes à la paroi cellulaire, ingestion par incurvation de la paroi jusqu'à formation d'une vésicule entraînée vers l'intérieur de la cellule, puis digestion par l'action d'enzymes cellulaires.
Photosynthèse	Phénomène physiologique par lequel les végétaux pourvus de chlorophylle fixent, grâce à l'énergie solaire, le carbone du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère pour assurer la synthèse de molécules organiques, et rejettent de l'oxygène.
Phycotoxine	Toxine produite par une algue.
Phytoplancton	Organismes végétaux en suspension dans l'eau.
Plancton	Ensemble des organismes qui demeurent en suspension dans l'eau, sans pouvoir opposer de résistance effective aux courants.
Productif	Se dit d'un milieu qui contient une grande concentration en nutriments, ce qui favorise la croissance d'une quantité importante d'algues et de plantes aquatiques.
Production primaire	Production de matière organique végétale issue de la photosynthèse, par des organismes autotrophes.
Ruissellement	Écoulement des eaux de pluie sur le bassin versant, dont l'action érosive est considérable.
Source diffuse	Source de pollution des eaux de surface ou souterraines ne provenant pas d'un seul point, mais plutôt d'une manière étendue, par exemple par lessivage du sol.
Turbidité	Réduction de la transparence de l'eau due à la présence de matière non dissoute.

INTRODUCTION

En août 2008, une prolifération d'algues toxiques a coloré de rouge l'estuaire du Saint-Laurent sur une superficie de plus de six cents kilomètres carrés, entre l'embouchure du fjord du Saguenay et Rimouski (Measures et Lair, 2008). D'après les analyses des experts, l'algue *Alexandrium tamarense* a atteint mortellement le système nerveux de nombreux poissons, oiseaux et mammifères marins (MPO, 2008). Environ tous les deux ans, cette algue fait des floraisons assez massives (Cliche, 2009), causant parfois la fermeture de plusieurs zones de cueillette de mollusques dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Duchesne, 2000). Toutefois, l'épisode d'août 2008 semble être le premier à connaître une telle ampleur et à avoir un effet aussi dévastateur dans la chaîne alimentaire marine au Québec (Vallières, 2008).

La majorité des articles qui ont couvert l'évènement ont indiqué qu'il s'agissait d'un cas exceptionnel dû à des circonstances naturelles rarement réunies (MPO, 2008; Thériault, 2008b; Vallières, 2008). Les causes les plus fréquemment nommées sont les pluies intenses et les faibles vents. Les précipitations auraient augmenté le débit des rivières qui apportent des composés dissous, diminuent la salinité et réchauffent l'eau de surface (Thériault, 2008a). D'ailleurs, il semblerait que cette algue se développe davantage en présence d'eau douce et de substances humiques naturelles. Les vents faibles auraient également procuré un milieu plus propice au développement de l'algue (Cliche, 2009). Ainsi, plusieurs scientifiques soutiennent que ce malheureux phénomène serait lié à des facteurs exclusivement naturels et non pas à l'activité humaine ou à la pollution (Thériault, 2008a; Thériault, 2008b; Vallières, 2008).

Pourtant, des cas semblables sont de plus en plus souvent observés dans plusieurs régions du monde, et l'une des hypothèses fréquemment citées est l'augmentation de l'enrichissement en nutriments domestiques, agricoles et industriels (AEE, 2006; Anderson, 2004; Solow, 2004; Tirado, 2008). En fait, seuls quelques rares articles précisent que les pluies intenses d'août 2008 avaient sans doute lessivé les terres de leurs phosphates et nitrates et fait déborder plusieurs systèmes d'égout en amont de l'estuaire, jouant peut-être un rôle dans cette marée rouge (Saint-Pierre, 2008; Moreault, 2009). Selon certains, cette croissance démesurée d'algues en milieu marin peut se comparer aux fleurs d'eau d'algues bleu vert observées dans de nombreux lacs, favorisées par l'arrivée de nutriments anthropiques ruisselants des bassins versants, qui

sont normalement disponibles qu'en quantité limitant la croissance excessive dans les milieux naturels (Tirado, 2008; Solow, 2004). Les changements climatiques, accélérés par les activités humaines et provoquant des conditions climatiques de plus en plus extrêmes, sont aussi soupçonnés d'agir sur l'augmentation de la fréquence et la sévérité des floraisons d'algues nuisibles (GIEC, 2007; Tirado, 2008; Van Dolah, 2000).

Si ces hypothèses sont confirmées, il est à présager qu'un événement aussi catastrophique que celui de 2008 puisse se reproduire dans le futur. L'impact de marées rouges meurtrières récurrentes pourrait être irréversible, considérant le fait que, durant cet épisode, presque autant de bélugas sont morts en seulement quelques semaines qu'en moyenne durant toute une année (Saint-Pierre, 2008). Il serait donc urgent de se préparer pour faire face à un tel phénomène. Pour résoudre ce problème sérieux, le développement des activités humaines doit devenir plus durable. Non seulement économiquement viable, il doit être orienté vers les besoins sociaux et environnementaux actuels, tout en ne négligeant pas ceux des générations futures (Goldemberg *et al.*, 2001). Par exemple, les activités qui ont lieu dans les bassins versants en amont de l'estuaire pourraient nuire significativement au succès de pêche, d'ostréiculture et de tourisme des régions en aval. Il serait aussi important d'informer adéquatement la population. La marée rouge pourrait même servir d'exemple clé pour contribuer aux efforts de plusieurs organisations environnementales, démontrant bien que le fleuve est un réservoir de tous les bassins versants qui s'y jette et qu'il est urgent d'agir pour préserver la santé de son environnement. Santé d'autant plus importante qu'elle est nécessaire pour assurer plusieurs activités sociales et économiques au Québec. Enfin, il est d'un intérêt primordial de déterminer si la marée rouge exceptionnelle de 2008 est une conséquence des activités humaines, car si c'était le cas, ces activités pourraient être modifiées de façon à renverser les tendances actuelles (Van Dolah, 2000).

L'objectif général de cet essai sera donc de déterminer s'il s'agit d'un événement isolé, extrêmement rare et d'origine principalement naturelle, ou s'il s'agit plutôt d'un signe révélateur d'un développement non durable et susceptible de se reproduire dans les années à venir. À l'issue d'une analyse multidisciplinaire de l'état actuel de la situation, basée sur des sources fiables et diversifiées, des recommandations seront énumérées quant aux actions à entreprendre pour éviter qu'un événement d'une telle ampleur ne se répète. Pour atteindre cet objectif général, les efforts seront orientés autour des quatre objectifs spécifiques suivants :

- Caractériser les conditions de croissance de l'algue *Alexandrium tamarense* et les effets nuisibles environnementaux, économiques et sociaux qui sont associés à ses floraisons dans le Saint-Laurent et ailleurs dans le monde.
- Décrire les caractéristiques naturelles et humaines de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent qui influencent les conditions de croissance de l'algue *Alexandrium tamarense* identifiées précédemment et leur évolution depuis quelques décennies.
- Déterminer la part relative des facteurs d'origine anthropique par rapport aux éléments d'ordre naturel mis en cause lors de la marée rouge de 2008 et le potentiel d'augmentation de la fréquence et de la gravité des floraisons dans l'estuaire à l'avenir, en considérant les tendances mondiales.
- Établir un plan d'intervention pour prévenir ou minimiser les impacts de futures marées rouges dans l'estuaire en agissant sur les éléments humains et naturels identifiés précédemment.

Cet essai sera donc présenté en quatre chapitres. Le premier chapitre permettra de décrire les problèmes environnementaux et socio-économiques que posent les marées rouges dans le Saint-Laurent et dans le monde. En second lieu, les conditions naturelles et anthropiques qui favorisent la croissance d'*A. tamarense* dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent et leur évolution seront décrites. Le troisième chapitre portera sur la détermination des causes et le potentiel de récurrence de la marée rouge de 2008 dans l'estuaire. Enfin, il s'agira d'élaborer un plan d'intervention multidisciplinaire pour contrer ce phénomène. À titre informatif, l'annexe 1 présente de nombreux documents pouvant aider à approfondir la compréhension de certains détails de la situation.

1 PORTRAIT DE LA SITUATION

Afin d'exposer clairement la problématique des marées rouges, ce premier chapitre rassemble les connaissances existantes sur le cycle de vie, les conditions de croissance et la toxicité de l'algue *Alexandrium tamarense*, ainsi que les effets nuisibles environnementaux, économiques et sociaux qui sont associés à ses floraisons dans le Saint-Laurent et ailleurs dans le monde, tout en considérant leur évolution dans le temps.

1.1 Description de l'algue *Alexandrium tamarense*

La marée rouge exceptionnelle de 2008 dans l'estuaire du Saint-Laurent a été causée par l'espèce *Alexandrium tamarense* (Cliche, 2009; MPO, 2008a; MPO, 2010a). Pour plus de précision, cette espèce possède les synonymes suivants dans la littérature scientifique : *Gonyaulax tamarensis*, *Protogonyaulax tamarensis* et *Alexandrium excavatum* (Levasseur, 1996; Michaud *et al.*, 2002; Shumway *et al.*, 2003). Il s'agit d'une algue microscopique unicellulaire qui devient visible lorsqu'elle se multiplie très rapidement et s'accumule près de la surface de l'eau (MPO, 2008a; Saint-Pierre, 2008; Thériault, 2008a). Bien qu'au microscope, la cellule soit de couleur dorée, elle donne à l'eau un aspect rouge durant les fleurs d'eau (WHOI, 2006). Cette espèce de phytoplancton appartient à la division de pyrrophytes et dans la classe des dinophycées, mieux connue sous le nom de dinoflagellés, car la cellule algale est munie de deux flagelles (Levasseur, 1996; Measures et Lair, 2008; Weise *et al.*, 2002). Le terme « marée rouge » est une appellation commune qui fait référence à ces fleurs d'eau spectaculaires, mais il est important de préciser qu'il ne s'agit pas d'une marée et que l'expression la plus correcte est « floraison d'algues nuisibles » (Vallières, 2008; WHOI, 2006).

1.1.1 Cycle de vie

L'annexe 2 illustre le cycle de vie d'*Alexandrium*. Au début, les kystes sont en dormance au fond de l'eau, enterrés dans les sédiments. S'ils ne sont pas perturbés par des forces physiques ou naturelles, ils peuvent rester ainsi durant de nombreuses années. (WHOI, 2006). Les floraisons débutent habituellement dans les zones riches en kystes (Gagné, 2010; Roy, 2010). Dans le golfe du Saint-Laurent, les zones de Sept-Îles et Manicouagan sont des lieux reconnus pour l'éclosion des fleurs d'eau (Gagné, 2010). En 2008, la marée rouge a vraisemblablement pris naissance à l'embouchure du Saguenay. Il semble que des bancs de kystes benthiques se seraient développés dans cette région au cours des

dernières années, mais des études supplémentaires seront nécessaires pour le confirmer (Gagné, 2010; Roy, 2010).

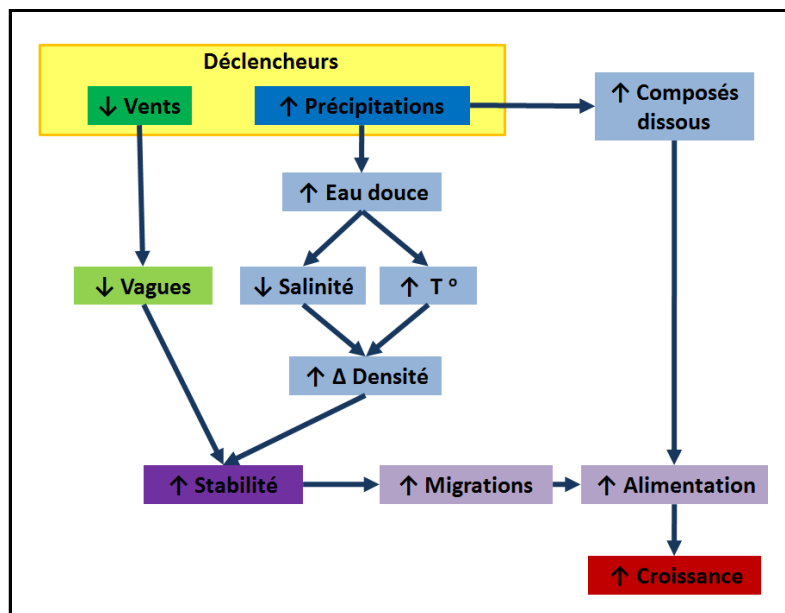
Les kystes peuvent germer durant certaines périodes de l'année seulement, en présence d'oxygène, d'eau plus chaude, d'une augmentation de luminosité et de suffisamment de nutriments (Anderson, 2004; WHOI, 2006). Lorsque les kystes s'ouvrent, une cellule flagellée en émerge et nage jusqu'à la surface. Cette cellule est asexuée et se reproduit par division simple après quelques jours pour former une nouvelle population en floraison (Sellner *et al.*, 2003; WHOI, 2006). Ces nageurs actifs sont capables de se maintenir dans la zone euphotique avec aisance et d'accéder aux nutriments en profondeur si ceux en surface sont diminués, alors que d'autres espèces de phytoplancton moins mobiles peuvent couler hors de la zone euphotique ou être limitées en nutriments (Weise *et al.*, 2002). Si les conditions optimales sont maintenues, les cellules feront de la photosynthèse et vont continuer de se diviser exponentiellement, passant de 2 à 4, de 4 à 8 et ainsi de suite (Anderson, 2004). Une croissance explosive peut être causée par une réponse métabolique à un stimulus particulier dans l'environnement ou à une concentration physique d'une espèce dans un secteur en raison de la circulation locale de l'eau (Bushaw-Newton et Sellner, 1999). Sans contrôle environnemental comme le broutage des organismes herbivores ou le manque de lumière ou de nutriments, cette fleur d'eau peut être catastrophique (Anderson, 2004). En effet, une seule cellule peut produire plusieurs centaines de cellules en quelques semaines, en nombre suffisant pour dominer le phytoplancton local et générer des toxines (WHOI, 2006).

Quand survient un déclin de la disponibilité des nutriments ou que les conditions de croissance ne sont plus optimales, la croissance s'arrête et les gamètes sont formés. Deux gamètes s'unissent pour former une cellule, qui se développe en un zygote et ensuite en un kyste (Anderson, 2004; Sellner *et al.*, 2003; WHOI, 2006). Le kyste en dormance coule dans la colonne d'eau jusqu'au fond et pourra germer l'année suivante (Sellner *et al.*, 2003; WHOI, 2006). Ce cycle vital favorise le succès d'établissement des fleurs d'eau. Le stade de dormance offre à ce dinoflagellé un avantage compétitif par rapport à d'autres populations qui ne peuvent persister dans des conditions pauvres en nutriments. Les kystes peuvent même résister à des températures froides extrêmes et à l'ingestion par des animaux. Ils représentent également une stratégie efficace de dispersion via les courants marins, les poissons et les eaux de ballast, afin de coloniser d'autres régions (Anderson, 2004; Sellner *et al.*, 2003).

1.1.2 Conditions de croissance

Dans le Saint-Laurent, il semble que les fleurs d'eau d'*A. tamarens*e soient favorisées par des phénomènes physiques ainsi que par la disponibilité de certains nutriments (Cliche, 2009; Thériault, 2008a). En fait, il existe un lien clair entre les fortes précipitations et les floraisons d'algues nuisibles (Gagné, 2010; Nolet, 2010; Weise *et al.*, 2002). Par exemple, une importante floraison d'*A. tamarens*e est survenue dans l'estuaire du Saint-Laurent en 1996 suite à de fortes précipitations au cours des 19 et 20 juillet (IML, 1996a). Un autre exemple d'une floraison massive de cette espèce a eu lieu dans le Ria de Ares et Betanzos en Espagne, suite à une période de fortes précipitations correspondant à plus de 2,75 fois la moyenne mensuelle (Weise *et al.*, 2002). Ces précipitations entraînent une série de phénomènes expliqués dans les paragraphes suivants, et résumés dans la figure 1.1.2.

Figure 1.1 Schéma simplifié des conditions de croissance d'*A. tamarens*e



Tout d'abord, la pluie amène davantage d'eau douce dans l'estuaire, ce qui favorise la stratification entre les masses d'eau douce en surface et d'eau salée en profondeur, et donc une plus grande stabilité de la colonne d'eau (Gagné, 2010; Measures et Lair, 2008; Nolet, 2010; Roy, 2010; Thériault, 2008a; Vallières, 2008; Weise *et al.*, 2002). D'ailleurs, une étude effectuée à Sept-Îles durant dix ans, entre 1989 et 1998, démontre une forte corrélation négative entre la salinité et la probabilité d'observer des cellules d'*A. tamarens*e (Weise *et al.*, 2002). De plus, l'eau douce en provenance des rivières est

plus chaude (Measures et Lair, 2008). L'augmentation de la température de l'eau active le métabolisme des organismes phytoplanctoniques, qui assimilent plus facilement les nutriments et se développent donc plus rapidement (Lapalme *et al.*, 2008). L'eau plus chaude favorise également la stratification des masses d'eau (Measures et Lair, 2008; Thériault, 2008a). En effet, la différence de salinité et de température des masses d'eau accentue leur différence de densité et réduit leur capacité à se mélanger (Cliche, 2009; Sellner *et al.*, 2003). D'autre part, une période de vents faibles (<4 m/s) crée peu de vagues, ce qui favorise également la stabilité de la colonne d'eau (Nolet, 2010; Roy, 2010; Weise *et al.*, 2002). Par exemple, une floraison d'*A. tamarensis* en juin 2004 dans l'estuaire du Saint-Laurent a été associée à un fort ruissellement de rivière et une période exceptionnellement longue de vents faibles d'environ 3 m/s durant 3 semaines (Weise *et al.*, 2002). Cette stabilité est favorable à la formation et la persistance des floraisons, car elle procure un milieu propice aux migrations verticales des cellules algales, qui nagent en surface le jour pour profiter de la lumière et qui utilisent les nutriments plus en profondeur durant la nuit (Gagné, 2010; Lapalme *et al.*, 2008; Nolet, 2010; Sellner *et al.*, 2003; Vallières, 2008; Weise *et al.*, 2002). En outre, cette stabilité est essentielle, car des vents d'une vitesse de plus de 8 m/s suffisent à disperser les cellules algales et mettre fin aux floraisons. Des expériences de laboratoire ont aussi démontré que la croissance des dinoflagellés peut être négativement affectée par la turbulence en raison de l'effet de cisaillement des fluides sur la physiologie de la cellule (Weise *et al.*, 2002).

D'autre part, l'augmentation des pluies augmente le ruissellement des terres et le débit des rivières, transportant ainsi des composés dissous qui stimulent la croissance de l'algue dans les zones côtières (Nolet, 2010; Vallières, 2008). Une étude a d'ailleurs démontré un lien étroit entre le débit élevé de la rivière Moisie et le patron annuel des floraisons d'*A. tamarensis* dans l'estuaire du Saint-Laurent. De plus, le patron des floraisons correspondait étroitement à l'étendue du panache d'eau douce produit par les rivières Manicouagan et Aux-Outardes (Weise *et al.*, 2002). De manière générale, il y a une connexion claire entre les niveaux de nutriments et la production primaire, c'est-à-dire la production de matière organique végétale issue de la photosynthèse (Solow, 2004). Toutefois, ce lien ne se réduit pas à cette simple interaction, car plusieurs phénomènes sont impliqués.

Pour commencer, il est important de préciser que, comme les autres dinoflagellés, *A. tamarensis* est mixotrophe, c'est-à-dire que cet organisme a la double capacité de

produire de la matière organique via la photosynthèse (autotrophie) et d'en consommer directement dans le milieu (hétérotrophie) par l'absorption de composés dissous ou par ingestion de particules au moyen de la phagocytose (Anderson *et al.*, 2002; Gagné, 2010). La photosynthèse a lieu dans la zone éclairée de la colonne d'eau, appelée couche euphotique, qui est située principalement dans les cinquante premiers mètres de la surface (Levasseur, 1996). Elle forme de l'énergie à partir de l'énergie lumineuse, du dioxyde de carbone dissous (CO_2) et des nutriments comme le nitrate et le phosphore pour produire une matière végétale riche en carbone et de l'oxygène (Levasseur, 1996; Solow, 2004). La phagocytose est la capacité de la paroi cellulaire de certains organismes unicellulaires à adhérer à des particules de nitrate et de carbone présentes dans le milieu ambiant. Ces particules sont ensuite ingérées et entraînées vers l'intérieur de la cellule par incurvation de la paroi cellulaire jusqu'à formation d'une vésicule, puis elles sont digérées par l'action d'enzymes cellulaires (Gagné, 2010). Cette adaptation physiologique procurant à l'algue deux modes d'alimentation explique donc ses migrations quotidiennes dans la colonne d'eau (Anderson *et al.*, 2002).

La mixotrophie comporte donc un avantage évident pour *A. tamarense*, qui peut ainsi se nourrir durant les périodes d'absence de lumière (Anderson *et al.*, 2002). Néanmoins, ses deux modes de nutrition nécessitent une certaine disponibilité de nutriments dans le milieu ambiant. Dans les lacs et les cours d'eau, ce sont les phosphates qui ont le plus d'impact sur la croissance des algues bleu-vert (Greenpeace, 2008). Toutefois, dans les eaux océaniques, estuariennes et côtières, c'est plutôt la disponibilité d'azote qui influence la productivité du phytoplancton, dont les floraisons d'algues rouges (Greenpeace, 2008; Van Dolah, 2000). En plus de la charge en azote elle-même, des changements dans les ratios d'azote par rapport au phosphate, ou d'azote par rapport à la silice, sont souvent associés à des changements dans la composition des espèces phytoplanctoniques (Anderson *et al.*, 2002; Sellner *et al.*, 2003; Van Dolah, 2000). Par exemple, une diminution de la silice nécessaire pour la production de diatomées peut permettre une plus grande contribution des espèces ne requérant pas de silice comme les dinoflagellés (Sellner *et al.*, 2003; Van Dolah, 2000). Plus précisément, quelques études ont montré qu'*A. tamarense* se développe à de meilleurs taux de croissance et de production de biomasse en présence de substances humiques (Gagné, 2010; Gagnon *et al.*, 2005; Prakash *et al.*, 1973; Weise *et al.*, 2002).

Les substances humiques sont issues de la décomposition des matières végétales et animales par l'action des microorganismes sur les sols forestiers (Gagné, 2010; Thériault, 2008a; Weise *et al.*, 2002). Les substances humiques sont produites différemment selon les bactéries qui les dégradent, c'est pourquoi il n'existe pas de formule chimique unique pour les décrire. La matière organique est graduellement transformée en macropolymères, en acides humiques, en acides fulviques puis en humine. Cette dernière ne peut pratiquement pas être dégradée. À titre informatif, la décomposition de l'humine mène éventuellement à la formation du kérogène et du pétrole au bout de plusieurs millions d'années. Inversement, les acides aminés de l'acide fulvique peuvent aussi s'agglomérer et produire à nouveau de l'acide humique. Les substances humiques sont présentes en majeure partie dans les sols, mais également dans l'atmosphère et l'eau. Elles se retrouvent aussi dans les amendements agricoles comme le fumier et la tourbe et dans les effluents d'usine de traitement des eaux usées (Gagné, 2010). Selon les propriétés de la pluie, ces substances peuvent être dissoutes et transportées dans les eaux côtières (Gagné, 2010; Thériault, 2008a). Il est à noter que ces substances sont mal connues, car elles sont peu étudiées et que la méthode d'extraction pour les obtenir en laboratoire est longue et difficile. Par exemple, filtrer 200 litres d'eau peut représenter trois semaines de travail pour extraire que 200 à 300 mg d'acides fulviques et humiques (Gagné, 2010).

La croissance d'*A. tamarens* peut être stimulée par les substances humiques de plusieurs façons (Gagné, 2010). Premièrement, les groupements carboxyliques des substances humiques peuvent se lier avec certains ions métalliques présents dans la masse d'eau, ce qui aurait pour effet d'en réduire l'effet toxique et de favoriser la croissance de certaines algues. Deuxièmement, les oligoéléments métalliques comme le fer et le sélénium peuvent être transportés par les substances humiques puis être relargués dans le milieu marin, ce qui favorise la croissance (Gagné, 2010; Gagnon *et al.*, 2005). Troisièmement, les substances humiques sont de la matière organique qui peut se lier aux nitrates et à l'ammonium, ce qui enrichit davantage le milieu en éléments nutritifs (Gagné, 2010). Quatrièmement, les substances humiques pourraient modifier le métabolisme et la perméabilité membranaire des algues, facilitant ainsi leur prélèvement des éléments nutritifs dans le milieu (Gagné, 2010; Gagnon *et al.*, 2005).

Il est important de préciser que, bien qu'il existe une association entre les panaches de rivière et les floraisons de ce phytoplancton toxique, la communauté scientifique n'a pas encore élucidé tous les facteurs contribuant à la forte abondance de ces algues. La cause

principale de leur forte multiplication n'est pas clairement définie parmi les processus suivants : l'effet direct d'une faible salinité et d'une température plus élevée sur le taux de croissance; la disponibilité de nutriments dans le milieu ambiant; la présence de matière organique dissoute, d'éléments traces ou d'autres matériels qui pourraient servir de stimulant de croissance; et/ou l'augmentation de la stabilité de la colonne d'eau qui favorise la prolifération et la rétention des cellules (Levasseur, 1996; Weise *et al.*, 2002). Néanmoins, l'analyse de 10 ans de données à Sept-Îles indique que les floraisons sont reliées à la combinaison de ces variables environnementales clés, et que l'étendue des floraisons est contrôlée par la durée de ces conditions favorables. Cette combinaison de facteurs n'est pas réalisée tous les ans. La variabilité annuelle et les changements climatiques qui affectent ces facteurs vont influencer les dynamiques des floraisons d'*A. tamarensis*. En résumé, les conditions d'océanographie, d'hydrologie et de météorologie locales sont importantes pour l'initiation, le développement et la persistance de ces floraisons (Weise *et al.*, 2002).

Les facteurs naturels et anthropiques qui ont favorisé les conditions de croissance exceptionnelles de l'été 2008 seront discutés aux chapitres 2 et 3.

1.1.3 Toxicité

En général, les espèces d'algues toxiques sont présentes dans l'environnement en faible concentration et n'ont aucun impact environnemental ou sur les humains (Van Dolah, 2000). La toxicité dépend généralement de leur présence en grande concentration (Solow, 2004; Van Dolah, 2000). Seuls 2 % des 3 400 à 4 000 espèces de phytoplancton connues, soient 60 à 80 espèces, sont nuisibles ou toxiques (Solow, 2004; Van Dolah, 2000). Pour sa part, *A. tamarensis* produit une phycotoxine nommée saxitoxine et ses dérivés (MPO, 2010a). Les saxitoxines sont un groupe de guanidines hétérocycles (annexe 3) et sont solubles dans l'eau (Kwong *et al.*, 2006; Van Dolah, 2000). La plupart des mollusques filtrent l'eau pour s'alimenter de phytoplancton, indépendamment de leur toxicité, et accumulent les toxines dans leur chair (Duchesne, 2000; Kwong *et al.*, 2006; Thériault, 2008b; WHOI, 2006). Cette toxine cause ainsi l'intoxication paralysante par les mollusques (IPM) (AEE, 2006; Measures et Lair, 2008; Shumway *et al.*, 2003).

Certains experts suggèrent que les toxines IPM ont un rôle écologique en tant que défense chimique chez la palourde jaune, qui accumulerait ces toxines pour contrer la prédation par la loutre de mer. Il a d'ailleurs été démontré que la distribution des loutres de

mer d'Alaska coïncide avec les populations de palourdes non toxiques (Van Dolah, 2000). Ces toxines sont toutefois plus célèbres pour leurs effets négatifs. La saxitoxine est l'une des substances non protéiques les plus toxiques connues (Kwong *et al.*, 2006; Measures et Lair, 2008).

La saxitoxine produite par *A. tamarense* est une neurotoxine, car son action consiste à bloquer le transfert d'influx nerveux de n'importe quel système nerveux (IML, 1996a; Measures et Lair, 2008; Saint-Pierre, 2008). Elle agit sur les cellules nerveuses et musculaires en bloquant les canaux de sodium, ce qui empêche la conductance des signaux des neurones et mène à la paralysie musculaire (Geraci *et al.*, 1989; Kwong *et al.*, 2006; Van Dolah, 2000). Le premier site d'action de la saxitoxine est le système nerveux périphérique, où la liaison provoque une rapide apparition des symptômes en moins d'une heure (Van Dolah, 2000).

Les symptômes de l'IPM sont des picotements, engourdissements, maux de tête, nausées, étourdissements, troubles de la coordination, somnolence, incohérence et une faiblesse généralisée (Duchesne, 2000; Van Dolah, 2000). L'IPM provoque une paralysie généralement passagère, mais dans les cas d'intoxication importante, elle peut causer la mort par insuffisance respiratoire (Cliche, 2009; Duchesne, 2000; Kwong *et al.*, 2006; Shumway *et al.*, 2003; Vallières, 2008; Van Dolah, 2000). L'humain peut s'intoxiquer en consommant des mollusques contaminés, en particulier les moules et les palourdes, mais également les myes, les couteaux et les pétoncles (Levasseur, 1996; MPO, 2008a; Saint-Pierre, 2008; Thériault, 2008a).

Chez l'humain, la dose létale se situe entre 1 et 4 mg de saxitoxine équivalent (Kwong *et al.*, 2006; Van Dolah, 2000). Quand la concentration d'*A. tamarense* atteint 1000 cellules par litre, les mollusques exploités le long des rives du Saint-Laurent excèdent habituellement le seuil jugé critique pour la consommation humaine de 80 µg de saxitoxine équivalent par 100 g de chair de mollusque (Kwong *et al.*, 2006; Levasseur, 1996; Michaud *et al.*, 2002). Les mollusques peuvent parfois contenir plus de 10 000 µg/100 g de saxitoxine équivalent, donc l'ingestion de quelques mollusques seulement peut être fatale (Van Dolah, 2000). Les mollusques toxiques sont relativement insensibles aux toxines, même en fortes concentrations, ce qui ne permet pas d'éviter de les choisir en se fiant à leur aspect (Kwong *et al.*, 2006; Levasseur, 1996; WHOI, 2006). De plus, ces

toxines sont stables par rapport à la température, donc la cuisson ne réduit pas la toxicité des fruits de mer contaminés (Van Dolah, 2000).

Il n'y a pas d'antidote disponible pour contrer les effets de ces toxines. De l'attention médicale immédiate est donc requise si une victime est soupçonnée de souffrir d'une IPM (Duchesne, 2000; Kwong *et al.*, 2006). L'étude d'une fleur d'eau d'IPM à Kodiak, en Alaska, a permis de mesurer la vitesse d'élimination des toxines dans le sang. Celle-ci a été complète en moins de 24 heures, même pour les patients ayant souffert de paralysie respiratoire. La première voie d'élimination est le rein (Van Dolah, 2000). Bien que l'IPM causée par *A. tamarense* représente la principale menace, d'autres types d'intoxications liées à la consommation de mollusques dans le Saint-Laurent demeurent des menaces potentielles, notamment l'intoxication amnésique par les mollusques (IAM) et l'intoxication diarrhéique par les mollusques (IDM) (Duchesne, 2000).

Durant la marée rouge de 2008, il n'y a eu aucune intoxication humaine grâce au bon fonctionnement des programmes de surveillance de la toxicité des mollusques (Vallières, 2008). Toutefois, il y a eu une incomparable intoxication de la chaîne alimentaire marine (Measures et Lair, 2008; MPO, 2008a; MPO, 2010a). En effet, la saxitoxine et ses dérivés ont été confirmés dans les échantillons d'eau en utilisant la chromatographie liquide de haute performance (CLHP) (Measures et Lair, 2008). Les algues toxiques sont consommées par des zooplanctons, des mollusques ou des poissons phytophages qui accumulent les toxines (Kwong *et al.*, 2006; IML, 1996b; Shumway *et al.*, 2003; Solow, 2004). C'est en ingérant ces proies contaminées que des poissons piscivores, des oiseaux piscivores ou charognards et des mammifères marins sont morts des effets de la toxine (Kwong *et al.*, 2006; Shumway *et al.*, 2003; Solow, 2004; Thériault, 2008a; Thériault, 2008b). Les poissons seraient également affectés directement par le contact de la toxine, qui peut endommager le tissu épithélial des branchies (Levasseur, 1996). Des tests ELISA ont prouvé la présence des toxines dans les tissus de la plupart des organismes échantillonnés (Measures et Lair, 2008; Thériault, 2008b). Les analyses ont exclu les autres possibilités de causes des mortalités pour la majorité des animaux examinés, incluant des mollusques, 15 espèces d'oiseaux, 2 espèces de poissons et 4 espèces de mammifères marins. La plupart des animaux étaient bien en chair et semblent être morts subitement (Measures et Lair, 2008). De plus, la virulence de l'événement a été de courte durée puisque les carcasses retrouvées durant les jours suivants étaient dans un état de décomposition avancée (Measures et Lair, 2008; Thériault, 2008b).

Pour prévenir des intoxications humaines, Santé Canada et l'Agence canadienne d'inspection des aliments ont émis des avis publics durant la marée rouge de 2008. Ils ont recommandé de ne pas consommer le foie et les viscères de poissons et de mollusques prélevés dans l'estuaire et le golfe, du moins durant quelques semaines, le temps que ces organismes se débarrassent naturellement de leurs toxines. Il a également été recommandé d'éviter la consommation des viscères de sauvagine dans l'estuaire du Saint-Laurent au cours de l'automne (Measures et Lair, 2008; MPO, 2008a). La consommation de la chair est demeurée sécuritaire, car la toxine se concentre dans le foie et les glandes digestives des organismes contaminés (IML, 1996b; Measures et Lair, 2008; MPO, 2008a; Vallières, 2008). Il est à noter que les invertébrés comme le crabe et le homard ne sont pas affectés par cette toxine à cause d'un système nerveux différent de celui des mollusques et des espèces pélagiques (Thériault, 2008b).

D'autre part, les algues toxiques peuvent avoir d'autres effets pervers. Parfois, il y a des algues toxiques en quantité suffisante pour être dangereuses pour la santé, mais en densité insuffisante pour colorer l'eau (Anderson, 2004; WHOI, 2006). De plus, les toxines sécrétées par *A. tamarense* ont aussi des effets non létaux qui n'ont pas été mesurés lors de la marée de 2008. Par exemple, les toxines peuvent rendre les oiseaux plus vulnérables à d'autres facteurs de stress dans leur environnement, ou encore, une baleine légèrement intoxiquée peut être désorientée et avoir plus de chances de se faire heurter par un bateau (Cliche, 2009; Shumway *et al.*, 2003). Même mortes, les cellules d'algues toxiques peuvent causer des problèmes. En fin de vie, les cellules coulent au fond de l'eau où elles se décomposent par action bactérienne. Les bactéries utilisent de l'oxygène dissous dans les eaux de fond et peuvent créer des « zones mortes » lorsque l'oxygène consommé n'est pas remplacé en raison de la stratification de l'eau. Ces zones peuvent interférer avec les comportements migratoires des crevettes, homards et d'autres espèces, et mener à un déclin de biodiversité (Solow, 2004).

1.2 Impacts des marées rouges dans le Saint-Laurent

L'algue *Alexandrium tamarense* est naturellement présente dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent et ses effets sur les cultures de mollusques sont étroitement surveillés (Measures et Lair, 2008; MPO, 2008a; Thériault, 2008a). Toutefois, la floraison de l'été 2008 se distingue à plusieurs égards, notamment en ce qui a trait aux conséquences environnementales et socio-économiques.

1.2.1 Historique

Les floraisons d'*A. tamarense* sont des événements annuels récurrents en plusieurs endroits de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, entre les mois de juin et septembre (Duchesne, 2000; Levasseur, 1996; Weise *et al.*, 2002). L'initiation, la durée et l'ampleur de ces floraisons varient d'une année à l'autre (Weise *et al.*, 2002). Néanmoins, des fleurs d'eau assez massives sont observées environ tous les deux ans (Cliche, 2009).

Des fleurs d'eau notables d'*A. tamarense* ont eu lieu en 1996 et 1998 (IML, 1996a; Thériault, 2008a). La floraison de 1996 est survenue le long de la rive sud pendant trois semaines en août. Des moules analysées contenaient jusqu'à 178 µg de saxitoxine par 100 g, soit le double de la norme acceptée pour la consommation humaine (IML, 1996a). Durant cette période, des résidents ont rapporté la présence de lançons et de goélands morts sur les plages de Ste-Anne-des-Monts, à Rivière-à-Claude, à Rivière Madeleine et au large de Rimouski. Deux chats domestiques qui auraient mangé des lançons sur la plage ont également éprouvé des vertiges, des pertes de locomotion et des signes de paralysie partielle (IML, 1996a; Shumway *et al.*, 2003). Des concentrations de 360 µg/100 g de saxitoxine ont été trouvées dans les lançons, 110 µg/100 g dans l'intestin des oiseaux et 48 µg/100 g dans leur cerveau (Shumway *et al.*, 2003). Il y a aussi eu une marée rouge en 1998. Au total, 21 bélugas sont morts durant cette année, alors que la moyenne de mortalités annuelles est de 15, ce qui pourrait indiquer que certains bélugas ont peut-être succombé de l'IPM (Saint-Pierre, 2008; Thériault, 2008a).

L'Agence canadienne d'inspection des aliments surveille les algues et les mollusques toxiques dans plusieurs sites coquilliers et procède à leur fermeture quand les niveaux de toxicité excèdent la norme acceptable (Levasseur, 1996; Measures et Lair, 2008). Malgré cette surveillance, des cas d'intoxication liés à la consommation de mollusques sont déclarés chaque année au Québec. En fait, le Saint-Laurent est la région au Canada où l'on a répertorié le plus grand nombre de cas d'IPM, soit plus de 215 cas qui ont causé le décès de 25 individus depuis 1880 (Duchesne, 2000; SLV2000, 2003). La surveillance et la fermeture des sites de culture représentent des coûts substantiels (Solow, 2004). Des échantillons de mollusques sont prélevés de façon systématique chaque semaine et sont testés à l'aide de souris de laboratoire (Levasseur, 1996). De plus, après une floraison importante en 1996, davantage d'actions ont été entreprises : augmentation de la fréquence du monitoring des algues toxiques; ajouts de stations d'échantillonnage au large et le long de la côte; survols en hélicoptère pour déceler la présence d'eau colorée;

et, des analyses plus poussées pour déterminer par CLHP les teneurs en saxitoxine dans les animaux morts récoltés (IML, 1996a). Cette situation est fâcheuse d'un point de vue économique, mais elle affecte aussi les activités des milliers de personnes qui s'adonnent à la cueillette artisanale des mollusques sur les deux rives du fleuve. En effet, les secteurs où les cueilleurs peuvent récolter des mollusques propres à la consommation sont devenus très rares, car plusieurs sites sont également sujets de fermeture en raison de contamination bactériologique (Duchesne, 2000).

1.2.2 Évènement de 2008

La marée rouge de l'été 2008 a été visible du 5 au 27 août (Cliche, 2009; MPO, 2010a). Les algues s'étaient accumulées en surface, teintant l'eau d'un rouge sang sur une superficie de 600 kilomètres carrés (annexe 3) (Cliche, 2009; Measures et Lair, 2008). La fleur d'eau s'est formée très en amont des lieux où on les trouve habituellement, soit dans l'embouchure du fjord du Saguenay à Tadoussac, plutôt qu'entre Baie-Comeau et Sept-Îles (Cliche, 2009; MPO, 2010a; Saint-Pierre, 2008). Ensuite, la marée rouge a dérivé vers la rive sud du Saint-Laurent avec le courant de Gaspé jusque dans le secteur de Sainte-Anne-des-Monts (Measures et Lair, 2008; MPO, 2010a; Saint-Pierre, 2008; Thériault, 2008a). La nappe s'est finalement fragmentée en raison des forts vents et s'est diluée en atteignant le nord-ouest du golfe du Saint-Laurent durant la semaine du 18 août (Measures et Lair, 2008; MPO, 2010a; Thériault, 2008b). Ainsi, cette situation était exceptionnelle par sa forte concentration, son étendue et sa persistance (Vallières, 2008).

Cette marée rouge est responsable d'une mortalité faunique sans précédent, comptant des milliers de poissons et d'oiseaux et une centaine de mammifères marins (annexe 3) (Cliche, 2009; Measures et Lair, 2008; MPO, 2008a; MPO, 2010a; Thériault, 2008b). Les mammifères marins touchés étaient surtout des phoques gris, mais quelques phoques communs, une dizaine de marsouins communs et dix bélugas ont été retrouvés morts (Saint-Pierre, 2008; Vallières, 2008). Le nombre de bélugas atteints est inquiétant, car leur population ne compte que 1 000 à 2000 individus dans le Saint-Laurent, et que la moyenne de mortalités au mois d'août est en moyenne de 2,7 individus seulement (Measures et Lair, 2008). Parmi les espèces d'oiseaux touchés, des cormorans, des fous de Bassan, des mouettes tridactyles, des petits pingouins, des eiders, des fulmars, des grands hérons et quatre espèces de goélands ont été du nombre (Measures et Lair, 2008; Saint-Pierre, 2008). Les poissons touchés étaient surtout des lançons, des éperlans, des esturgeons et des aloses (Measures et Lair, 2008; Saint-Pierre, 2008). Quelques

invertébrés ont également été victimes de la marée rouge, notamment des concombres de mer, des crabes et des buccins (Measures et Lair, 2008). Les carcasses ont été trouvées flottant à la surface ou échouées sur les îles et les rives du fleuve, notamment dans l'entrée du Saguenay, à Saint-Simon, près de Baie-Comeau, à Sainte-Luce, à l'île aux Basques, à l'île Verte, à Saint-Denis-de-Kamouraska et à Sainte-Flavie (Thériault, 2008b). La distribution des mortalités était temporellement et géographiquement associée à la dérive de la floraison. Des poissons et des oiseaux aux facultés affaiblies, ainsi que des baleines et des phoques aux comportements inhabituels ont aussi été observés (Measures et Lair, 2008). Selon les experts, les organismes qui ont survécu à cet événement catastrophique ne devraient pas subir d'effets permanents de cette contamination (Thériault, 2008a).

Cette floraison toxique a également eu des impacts socio-économiques. Le ministère des Pêches et Océans Canada a été dans l'obligation de procéder à la fermeture de la majorité des secteurs coquilliers de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent en raison des risques pour la santé humaine (Measures et Lair, 2008; MPO, 2008a). Les zones de cueillette visées étaient situées entre le fjord du Saguenay et Sept-Îles sur la rive nord et comprenaient toutes celles du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie sur la rive sud (Saint-Pierre, 2008). L'interdiction de la cueillette des mollusques a été levée pour la Côte-Nord au début de septembre, mais est demeurée quelques semaines de plus pour la rive sud qui a été davantage touchée (Measures et Lair, 2008; MPO, 2008a; Thériault, 2008b). Ces fermetures ont affecté le travail d'une cinquantaine d'employés des usines de transformation des mollusques de la Haute-Côte-Nord et mis en jeu les emplois d'une centaine de cueilleurs (Thériault, 2008a).

1.3 Évènements semblables à l'international

L'étude des floraisons d'*A. tamarense* dans d'autres régions du monde peut nous permettre de mieux prévoir l'évolution future de la situation au Québec, notamment les cas où la toxicité a affecté la chaîne alimentaire marine.

1.3.1 Impacts environnementaux

Voici quelques cas de floraisons d'*A. tamarense* et les effets environnementaux qui y sont associés dans différentes régions du monde. À la fin du printemps 1969 au Royaume-Uni, une floraison de cette espèce a causé la mort soudaine de nombreux oiseaux marins et intoxiqué plusieurs humains. Un pourcentage catastrophique des cormorans huppés

nichant au Northumberland, soit plus de 80 %, sont morts durant cet évènement. De plus, plusieurs lançons sont morts et ceux-ci sont la proie principale des cormorans. Un autre évènement semblable a eu lieu en 1975, et 60 % des cormorans nicheurs en sont morts. Les mollusques récoltés à proximité contenaient environ 7 500 µg/100 g de toxines (Shumway *et al.*, 2003). *A. tamarense* a aussi des impacts en Argentine. La première floraison a été enregistrée en 1980, mais depuis les années 1990, il y en a tous les ans (Van Dolah, 2000). En Amérique du Nord, cette algue a tué 1 600 canards noirs qui avaient mangé des mollusques contaminés en 1972 au New Hampshire (Shumway *et al.*, 2003). Au Massachusetts, une floraison de ce dinoflagellé a causé la mort d'au moins 620 oiseaux marins de 13 espèces différentes, également en 1972 (Shumway *et al.*, 2003). De plus, au cours de l'automne 1987, 14 baleines à bosse ont été trouvées mortes échouées sur les plages de la baie de Cape Cod après avoir mangé du maquereau contenant de la saxitoxine. Dans ce cas précis, le dinoflagellé responsable de l'intoxication paralysante par les mollusques n'a pas été identifié précisément, mais cela pourrait correspondre à *Alexandrium tamarense*. Comme il n'y avait pas de saxitoxine dans l'eau ni dans les mollusques durant cette période, il semble que les maquereaux auraient accumulé la toxine dans le golfe du Saint-Laurent durant l'été et l'auraient transporté jusqu'au golfe du Maine et la baie de Cape Cod (Geraci *et al.*, 1989). Au Canada, il y a eu des cas de mortalités de harengs liés aux efflorescences d'*Alexandrium* dans la baie de Fundy en 1976 et 1979 (Levasseur, 1996). Plus récemment, en juillet et août 2004, les bancs de conchyliculture ont été fermés de la Nouvelle-Écosse jusqu'à Cape Cod en raison de la pire floraison d'algue toxique (*Alexandrium sp.*) en 23 ans (Anderson, 2004).

Les fleurs d'eau d'algues nuisibles sont une menace sérieuse pour la santé des écosystèmes (Shumway *et al.*, 2003). Une floraison d'algue toxique peut altérer de façon permanente la structure d'une chaîne alimentaire, causant des mortalités massives de mollusques, mammifères marins, poissons, oiseaux marins et d'autres animaux qui les consomment (Anderson, 2004; Gulland et Ailsa 2007). La plupart des oiseaux et des mammifères marins ont de faibles taux de recrutement et le rétablissement des populations peut être lent. Les espèces menacées sont particulièrement à risque (Shumway *et al.*, 2003). Certains oiseaux vivants dans des régions où les fleurs d'eau d'algues nuisibles ont régulièrement lieu ont développé un comportement pour éviter la consommation d'algues toxiques. Les oiseaux naïfs, c'est-à-dire ceux qui n'ont pas rencontré de floraisons, sont donc plus à risque d'intoxication. De plus, les oiseaux qui ont

l'opportunité de goûter et de régurgiter rapidement, comme les goélands et les canards, ont un meilleur avantage pour éviter les algues toxiques que ceux qui avalent leur proie entière comme les cormorans. Même s'ils ont adopté des comportements pour éviter de consommer des mollusques intoxiqués, ces oiseaux privilégiés peuvent être affectés par les floraisons toxiques. Par exemple, les eiders du Maine sont contraints de manger des moules plus petites dans la partie haute du rivage, car elles sont moins toxiques, ou encore ils changent de proie pour des oursins moins intéressants au niveau énergétique, ou même pire, ils cessent totalement de s'alimenter (Shumway *et al.*, 2003).

1.3.2 Impacts socio-économiques

Les fleurs d'eau d'algues nuisibles sont une menace sérieuse pour la santé humaine, les ressources alimentaires et la récréation (Shumway *et al.*, 2003; Solow, 2004). Dans le monde, les phycotoxines sont responsables de plus de 60 000 cas d'intoxication humaine par année, avec un taux de mortalité de 1,5 %. Plus précisément, les cas d'empoisonnement d'humain à la saxitoxine s'élèvent à près de 2 000 par année dans le monde, avec un taux de mortalité de 15 % (Van Dolah, 2000). De plus, les impacts économiques sont majeurs pour plusieurs régions du monde. Par exemple, les chercheurs estiment que les floraisons d'algues nuisibles coûtent entre 50 et 100 millions de dollars aux États-Unis par année (Anderson, 2004; Bushaw-Newton et Sellner, 1999; Sellner *et al.*, 2003). Les résultats pour trois pays méditerranéens, soit la Grèce, l'Italie et l'Espagne, montrent que l'impact socio-économique total des fleurs d'eau d'algues nuisibles est d'environ 329 millions d'euros par an, soit 415 millions de dollars canadiens, basé sur des informations de 1989 à 1998 (AEE, 2006).

Les dommages économiques sont issus des effets directs et indirects des fleurs d'eau d'algues nuisibles. Pour la société, les programmes de surveillance des toxines dans les mollusques et dans l'eau, ainsi que les services d'avertissement du public, représentent des sommes substantielles (Anderson, 2004; Bushaw-Newton et Sellner, 1999; Sellner *et al.*, 2003). Les coûts requis pour les traitements médicaux de la population exposée sont aussi à considérer (AEE, 2006; Anderson, 2004; Bushaw-Newton et Sellner, 1999). Selon une étude européenne, chaque cas déclaré d'IPM coûterait 1 154 euros, soit environ 1 500 dollars canadiens (AEE, 2006). Pour les affaires liées aux pêcheries, les pertes économiques sont liées aux périodes de fermeture des stocks de mollusques et de poissons exploitables, à l'augmentation des coûts d'assurance, aux pertes d'emplois et à des faillites (AEE, 2006; Anderson, 2004; Bushaw-Newton et Sellner, 1999). De plus, les

valeurs de revente diminuent pour toutes les espèces de fruits de mer, car les consommateurs évitent aussi les récoltes sécuritaires en raison d'une réaction excessive aux avis de santé (AEE, 2006; Anderson, 2004). De plus, les régions côtières touchées par les fleurs d'eau subissent une réduction du tourisme et des services d'hôtellerie, de restauration et de récréation qui y sont reliées (Anderson, 2004; Bushaw-Newton et Sellner, 1999; Sellner *et al.*, 2003). D'autre part, dans certaines régions du monde, les fleurs d'eau d'algues nuisibles causent la mortalité de poissons, de plantes aquatiques et de coraux sauvages ou d'élevage (Anderson, 2004). De plus, plusieurs régions idéales pour établir une pêcherie de coquillages sauvages productive et rentable restent fermées toute l'année en raison d'une toxicité persistante de la ressource. Par exemple, la production d'Alaska a été estimée à 50 millions de dollars par année et ne peut être exploitée (Bushaw-Newton et Sellner, 1999). Les palourdes de Georges Bank subissent le même sort depuis 1969 en raison d'une continuelle contamination de toxines IPM (Sellner *et al.*, 2003).

1.3.3 Évolution des cas observés

Les floraisons d'algues nuisibles sont naturelles et ne sont pas nouvelles (Anderson, 2004). Les mortalités de la faune qui sont associées aux marées rouges avaient lieu au cours du Pliocène. En effet, un grand nombre d'oiseaux marins ont été trouvés dans des sédiments marins datant de plusieurs millions d'années en Floride, qui selon toute évidence seraient morts en raison d'une marée rouge (Bushaw-Newton et Sellner, 1999; Shumway *et al.*, 2003). De plus, les marées rouges ont été connues tout au long de l'histoire écrite. Dans la Bible, le nom «Mer Rouge» ferait référence aux floraisons d'algues toxiques (Vallières, 2008). Un extrait est d'ailleurs plutôt révélateur :

« Toutes les eaux du fleuve furent changées en sang. Les poissons qui étaient dans le fleuve périrent, le fleuve se corrompit, les Égyptiens ne pouvaient plus boire l'eau du fleuve, et il y eut du sang dans tout le pays d'Égypte. » (Exode 7:20-21).

En Amérique du Nord, les tribus indigènes évitaient les mollusques à certains endroits ou durant certaines périodes de l'année selon les écrits de Lescarbot en 1609. De plus, les carnets de bord de marins tels que les capitaines James Cook et George Vancouver en 1798 comprennent des descriptions d'eaux colorées et de mollusques toxiques (Anderson *et al.*, 2002).

Toutefois, les fleurs d'eau d'algues nuisibles semblent de plus en plus fréquentes et de plus en plus dévastatrices dans les eaux côtières du monde entier depuis les 30 dernières

années (AEE, 2006; Anderson, 2004; Bushaw-Newton et Sellner, 1999; Sellner *et al.*, 2003; Shumway *et al.*, 2003; Vallières, 2008; Van Dolah, 2000). Les chercheurs font référence à la récente expansion de fleurs d'eau d'algues nuisibles au moyen de l'expression « tendance apparente », car dans plusieurs lieux, il y a peu de données historiques disponibles. Dans la communauté scientifique, l'augmentation de ces observations est débattue. Cela pourrait simplement représenter une augmentation de l'examen minutieux de la qualité des fruits de mer et de l'évolution des technologies pour détecter et identifier les toxines, ou encore, il pourrait s'agir d'une réelle augmentation en fréquence, sévérité, et étendue des floraisons (Anderson, 2004; Gulland et Ailsa, 2007).

Pourtant, plusieurs lieux sont victimes d'une augmentation évidente. Par exemple, les marées rouges dans la région de Tampa en Floride avaient généralement lieu durant le printemps et l'été seulement, mais depuis quelques années, les floraisons se sont étendues sur toute l'année (Shumway *et al.*, 2003). Les mortalités massives de mammifères marins liées aux floraisons d'algues nuisibles sont en augmentation aux États-Unis depuis les 40 dernières années (Gulland et Ailsa, 2007). Presque toutes les eaux côtières dans les régions tempérées et tropicales sont dorénavant affectées par des fleurs d'eau d'algues nuisibles à certains degrés (Kwong *et al.*, 2006). Il y a désormais plus d'espèces d'algues toxiques, plus de toxines, plus de ressources marines affectées, plus de perturbations de la chaîne alimentaire marine et plus de pertes économiques liées aux floraisons d'algues nuisibles que jamais auparavant (Bushaw-Newton et Sellner, 1999). Ce fléau est considéré sérieusement par la communauté internationale. En effet, la menace de plus en plus importante que posent les fleurs d'eau d'algues nuisibles est sur l'agenda de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) depuis 1973 (AAE, 2006). Les causes de cette tendance inquiétante seront davantage discutées au chapitre 3.

2 DESCRIPTION DE L'ESTUAIRE ET DU GOLFE

Afin de mieux interpréter les conditions de croissance qui ont favorisé l'éclosion catastrophique de 2008 dans le Saint-Laurent, il est important de connaître l'évolution des caractéristiques naturelles et humaines de l'estuaire et du golfe et de leur bassin versant.

2.1 Description des caractéristiques naturelles

Les processus qui donnent un caractère unique à l'estuaire et au golfe du Saint-Laurent sont liés aux particularités de leurs masses d'eau, aux conditions météorologiques qui les

influencent, aux caractéristiques physiques de leur bassin versant et à la vaste biodiversité qu'ils contiennent.

2.1.1 Masses d'eau

Les caractéristiques des masses d'eau de l'estuaire et du golfe varient grandement d'une section à l'autre du Saint-Laurent, ainsi qu'en fonction de la profondeur et de la période de l'année. Leur relative complexité sera résumée dans la présente section, par une description sommaire de la bathymétrie, des courants, de la salinité, de la température, de l'oxygène dissous, des nutriments et des contaminants.

Premièrement, il importe de décrire les éléments géographiques qui supportent les masses d'eau. Le Saint-Laurent est un large système constitué de trois grandes sections, soit le fleuve, l'estuaire et le golfe (annexe 4). Le fleuve prend sa source dans les Grands Lacs et prend forme près de Cornwall en Ontario. Certains divisent la section fluviale en deux parties, soit le tronçon fluvial de Cornwall à la pointe Est du lac St-Pierre près de Trois-Rivières, et l'estuaire fluvial situé entre ce lac et l'île d'Orléans. L'eau est douce sur toute la section fluviale, la largeur varie de moins d'un kilomètre à 15 km et la profondeur est d'environ 13 m. L'estuaire fluvial se distingue, car on y perçoit encore l'influence des marées océaniques et que sa profondeur augmente graduellement jusqu'à 40 m. L'estuaire s'étend de la pointe Est de l'île d'Orléans jusqu'à l'axe Pointe-des-Monts et Cap-Chat. Il se divise en deux parts à l'embouchure du Saguenay, dans l'axe Tadoussac et Rivière-du-Loup. Le moyen estuaire est d'une largeur (17 km) et d'une profondeur (40 à 100 m) relativement faibles, et les eaux y sont saumâtres (1 à 25 ‰) et très turbides. Dans l'estuaire maritime, les eaux sont salées (25 à 31 ‰) et les profondeurs varient de 100 à 400 mètres (Levasseur, 1996). Enfin, le golfe est une mer presque fermée, entre l'estuaire maritime et le détroit de Cabot (annexe 5). Le golfe est traversé par le chenal Laurentien du plateau continental jusqu'à l'estuaire, ainsi que par deux dépressions secondaires, le chenal d'Esquiman et le chenal d'Anticosti, et par des hauts-fonds tels que le Plateau madelinien au sud du golfe (MPO, 2005). Les eaux salées (29 à 31 ‰) de l'océan Atlantique pénètrent dans le golfe par les détroits de Belle-Isle et de Cabot (Dufour *et al.*, 2009; Levasseur, 1996).

La circulation de l'eau dans le Saint-Laurent est très particulière. Les eaux de surface en provenance des Grands Lacs et des affluents du fleuve sont évacuées dans l'océan Atlantique, alors que les eaux profondes qui influencent le Saint-Laurent jusqu'à l'île

d'Orléans proviennent des courants du Labrador et du Gulf Stream en empruntant les mêmes détroits, mais à des profondeurs d'environ 200 m (Dufour *et al.*, 2009). En surface, le courant de Gaspé longe la côte sud de l'estuaire jusqu'à Percé et se disperse dans le golfe (Levasseur, 1996). La circulation de surface du nord du golfe est caractérisée par la gyre quasi-permanente antihoraire de l'ouest de l'île d'Anticosti (Weise *et al.*, 2002). L'eau du sud du golfe circule également dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, autour des Îles-de-la-Madeleine (Levasseur, 1996). Ces courants de surface sont illustrés à l'annexe 6. Dans la colonne d'eau, on peut réellement observer trois couches d'eau superposées dans l'estuaire maritime et le golfe durant l'été : la couche de surface (moins de 50 m) est relativement chaude et peu salée (27 à 32 ‰); la couche glaciale intermédiaire (de 50 à 125 m de profondeur) est très froide (-1 à 2 °C) et plus salée (31,5 à 33 ‰); la couche profonde est froide (2 à 5 °C) et encore plus salée (33 à 34 ‰) (annexe 4). Les différences de température et de salinité créent une variation de densité, permettant aux eaux plus chaudes et moins salées de flotter sur les autres. Cette stratification verticale réduit grandement le mélange entre les masses d'eau dans la majeure partie de l'estuaire (Gagnon, 1996; Levasseur, 1996). Toutefois, la bathymétrie de la rive nord du golfe et les parois abruptes du chenal Laurentien, notamment à l'embouchure du Saguenay, créent des culs-de-sac qui forcent les eaux profondes à remonter vers la surface. Par exemple, les eaux de la couche glaciale intermédiaire et de la couche profonde rencontrent une muraille sous-marine haute d'environ 325 m en face de Tadoussac, car les profondeurs varient de 350 à 25 m sur une distance de seulement 16 km (Levasseur, 1996). Pendant l'hiver, la couche de surface s'enfonce en raison du refroidissement, de la formation de glace de mer et de la réduction de l'apport d'eau douce (Dufour *et al.*, 2009; Levasseur, 1996). Au printemps suivant, cette couche d'eau est piégée sous une nouvelle couche superficielle et devient la couche intermédiaire froide. Ainsi, les masses d'eau peuvent rester dans le golfe pendant plusieurs mois dans la couche de surface jusqu'à quelques années dans les eaux profondes (MPO, 2005).

La température des masses d'eau de l'estuaire et du golfe varie selon les saisons et peut différer légèrement d'une année à l'autre. En surface, les températures maximales sont généralement atteintes au cours de la deuxième semaine d'août, avec une moyenne maximale de 15,1 °C dans le golfe et de 17,4 °C sur le plateau madelinien. Il est important de noter que dans l'estuaire et le long de la Basse-Côte-Nord, les zones de remontées d'eaux profondes maintiennent des températures estivales froides (5 et 7 °C) et

permettent des températures hivernales toujours au-dessus du point de congélation. En ce qui a trait aux tendances à long terme, les suivis indiquent que la température estivale moyenne de l'eau de surface du golfe a augmenté d'environ 2 °C entre 1985 et 2008. On note également un passage marqué entre une période plus froide et une période plus chaude aux environs de l'année 1993. De plus, les 2 années les plus chaudes depuis 1945 ont eu lieu durant la dernière décennie (annexe 7). Ces variations thermiques ont eu des effets remarquables sur certains organismes qui vivent dans cet environnement. Par exemple, l'important refroidissement des eaux de surface du nord-ouest de l'océan Atlantique en 1990-91 a retardé de deux semaines la période d'arrivée du capelan et le moment de reproduction du guillemot marmette. Malgré le retour à la normale de la température de l'eau quelques années plus tard, le guillemot et le capelan ont continué de se reproduire plus tard pendant le reste de la décennie 1990, témoignant un retard entre la réponse des oiseaux et des poissons aux conditions environnementales. En outre, la composition du régime alimentaire des oisillons des fous de Bassan de l'île Funk a changé en 1990, passant d'une utilisation d'espèces d'eau chaude comme le calmar et le maquereau à la consommation d'espèces d'eau froide comme le capelan, le hareng, le lançon, la morue et le saumon. Ce nouveau régime alimentaire fut maintenu jusqu'en 2004, car malgré un rapide retour des températures normales en surface, les poissons pélagiques d'eau chaude ne sont revenus dans la région qu'en 2005. Pour ce qui est de la température de l'eau de la couche intermédiaire, celle-ci est fortement influencée par la température de l'air de l'hiver précédent. L'observation d'une hausse de la température de l'air hivernale au cours des 100 dernières années aux stations de Charlottetown et de Pointe-aux-Pères indique donc un réchauffement probable de cette masse d'eau (annexe 7). Enfin, dans la couche profonde, la période allant de 1945 à 1967 a été caractérisée par des eaux froides (4 à 5 °C) et riches en oxygène dissous, dont la température a augmenté graduellement depuis 1967 et qui est demeurée relativement stable depuis 1980 (Dufour *et al.*, 2009).

En ce qui a trait au contenu des masses d'eau, il est pertinent d'observer la variation des concentrations d'oxygène dissous, de particules en suspension, d'éléments nutritifs et de contaminants. En surface, les eaux sont bien oxygénées grâce au contact avec l'atmosphère qui est favorisé par le brassage des vagues. Quant aux eaux profondes, les concentrations d'oxygène dissous dépendent de la proportion variable d'eau douce froide fortement oxygénée provenant du courant du Labrador et d'eau salée chaude à faible

teneur en oxygène provenant du Gulf Stream. Ces eaux voyagent de trois à quatre ans entre le détroit de Cabot et la tête du chenal Laurentien dans l'estuaire. Ce faisant, elles perdent peu à peu de leur concentration d'oxygène dissous au profit de la respiration des organismes. On observe cependant une intensification de l'appauvrissement des teneurs en oxygène des eaux profondes de l'estuaire. Depuis qu'elles sont étudiées dans les années 1930, les concentrations d'oxygène étaient supérieures au seuil hypoxique de 30 % de saturation. Toutefois, ces eaux ont été brièvement hypoxiques au début des années 1960, puis l'ont été de façon constante depuis 1984, à des niveaux de 19 à 21 % de saturation (annexe 7) (Dufour *et al.*, 2009; MPO, 2005). On estime qu'environ 50 à 70 % de cette diminution est associée à des changements dans les masses d'eau provenant de l'Atlantique du Nord-Ouest, qui sont peut-être liés à la variabilité du phénomène climatique nommé l'oscillation nord-atlantique (ONA) et au réchauffement global accéléré par les gaz à effet de serre (Dufour *et al.*, 2009). En effet, le climat détermine la proportion d'eau du courant du Labrador et du Gulf Stream qui entre dans le golfe. D'ailleurs, l'apport des eaux du courant du Labrador dans le Saint-Laurent a chuté de 72 % dans les années 1930 à 3 % entre 1984 et 2008 (MPO, 2010; MPO, 2005). D'autre part, l'augmentation de la demande en oxygène dans les sédiments est soupçonnée d'être responsable du reste du déclin observé dans les concentrations d'oxygène. En effet, un accroissement du flux de matière organique au fond de l'estuaire a été confirmé au moyen d'indicateurs biogéochimiques et micropaléontologiques préservés dans les sédiments (Dufour *et al.*, 2009; MPO, 2005). Ces matières organiques sont décomposées par des microorganismes qui consomment de l'oxygène (Lapalme *et al.*, 2008). L'accroissement du flux de carbone peut être relié à la variabilité naturelle de la productivité des eaux de surface, mais il peut également découler d'activités humaines telles que les rejets d'effluents municipaux, la déforestation, l'utilisation accrue d'engrais agricoles et l'érosion des sols. L'hypoxie peut causer un stress physiologique grave chez les organismes marins et modifier l'abondance, la diversité et l'activité des espèces benthiques. Par exemple, l'abondance de vers polychètes, d'échinodermes et de crustacés a fortement diminué en 2005 par rapport aux années 1970 et 1980. De plus, des études en laboratoire ont démontré une réduction de la croissance et de la capacité natatoire, ainsi qu'une augmentation de la mortalité des morues exposées à des niveaux d'oxygène semblables à ceux trouvés dans le milieu naturel (Dufour *et al.*, 2009). Cela signifie que les caractéristiques actuelles des eaux profondes de l'estuaire maritime ne

représentent pas un habitat viable pour la morue. Sous l'effet du réchauffement planétaire, la tendance à une stratification accrue et à un mélange vertical réduit risque de se maintenir, ce qui laisse présager un maintien de ces faibles teneurs en oxygène dissous (MPO, 2010).

Les caractéristiques des masses d'eau sont aussi influencées par leur teneur en matières en suspension (MES) et en nutriments. Les MES sont de minuscules particules solides organiques (végétales, animales ou détritiques) ou inorganiques, provenant du sol ou de sédiments du fond, des affluents ou des organismes du milieu, et qui se trouvent en suspension dans la colonne d'eau. Les MES sont une source de nourriture pour le zooplancton et les organismes benthiques comme les mollusques. Les fortes concentrations de particules en suspension augmentent la turbidité de l'eau, réduisent la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau et limitent la production primaire. À l'exception de l'estuaire maritime et de la zone de turbidité maximale (ZTM) dans l'estuaire moyen, l'intensité lumineuse ne semble pas être un facteur limitant pour la productivité primaire dans le golfe (Dufour *et al.*, 2009). De plus, ces particules transportent parfois des contaminants sur de grandes distances. Les concentrations de particules peuvent s'accroître sous l'effet de certaines activités humaines, telles que le dragage, la construction, l'agriculture et la foresterie (MPO, 2005). On constate une récente augmentation de la turbidité dans le secteur fluvial du Saint-Laurent, particulièrement en aval du lac Saint-Pierre, où la proportion de sites d'échantillonnage présentant une qualité bonne ou satisfaisante est passée de 65 % en 2001 à 26 % en 2005. Dans ce cas précis, ces changements ne résulteraient pas d'un accroissement des rejets urbains ou des activités agricoles, mais seraient attribuables à une modification du régime d'écoulement du fleuve et à une augmentation des processus de ruissellement et d'érosion. En effet, de 1995 à 2000, le débit du fleuve à la hauteur de Québec a diminué et on observait une baisse de la turbidité et des concentrations de phosphore. Par contre, de 2001 à 2005, le débit a augmenté et on a observé le phénomène inverse (PSL, 2008; Saulnier *et al.*, 2007).

Dans l'ensemble de l'estuaire et du golfe, les substances nutritives, notamment les nitrates, sont essentielles au déclenchement des proliférations printanières de phytoplanctons ainsi que des épisodes de production sporadiques et saisonnières dans certains sites. La convection verticale profonde qui a lieu en hiver homogénéise la colonne d'eau jusqu'à une profondeur d'environ 100 m et approvisionne la couche supérieure

d'une charge de substances nutritives qui varie d'une année à l'autre en fonction des conditions atmosphériques. Les tempêtes de vent d'automne qui balaient le golfe peuvent également créer un mélange vertical intense et contribuer à la hausse des concentrations hivernales de nitrates (Dufour *et al.*, 2009). Bien que les parties nord et est du golfe ont généralement une plus forte teneur en nutriments que la partie sud, il existe une forte variabilité spatiotemporelle des teneurs en nutriments en raison de la dynamique des glaces de mer, du débit fluvial, du brassage des vagues et de la circulation causée par les marées et le vent (Dufour *et al.*, 2009; MPO, 2005). La pollution anthropique par les nutriments représente une menace permanente et croissante pour la diversité biologique des écosystèmes côtiers et marins. La consommation de combustibles fossiles et les pratiques agricoles modernes ont multiplié par plus de deux fois la quantité d'azote réactif disponible, soit l'azote sous la forme chimique capable de stimuler la croissance des plantes, par rapport aux périodes préindustrielles. L'accumulation de phosphore et d'azote stimule la croissance d'algues et de certaines formes de bactéries, entraînant une baisse de la qualité de l'eau. Tel que mentionné plus haut, ces dépôts favorisent également des conditions hypoxiques, pouvant mener à la création de « zones mortes » dans les océans, c'est-à-dire des secteurs dénués de pratiquement toute vie marine (CBD, 2010). L'apport d'azote provenant d'activités humaines a fait augmenter de 25 % les charges d'azote dans les eaux côtières du Saint-Laurent. À l'échelle planétaire, l'apport annuel total de nouvel azote dans les eaux côtières serait à environ 40 % d'origine atmosphérique, 30 % serait issu des rejets riverains, 10 % de l'eau souterraine et 20 % de la fixation biologique naturelle. Au Canada, les charges d'azote et de phosphore résultant d'activités humaines ont causé, ou contribué à de multiples problèmes écosystémiques, dont l'accélération de l'eutrophisation de nombreux plans d'eau, la perte d'habitats fauniques, la contamination d'eaux souterraines, la mort de poissons par intoxication à l'ammoniac, la chute de populations d'amphibiens, l'augmentation de la fréquence et de l'étendue spatiale des proliférations d'algues toxiques dans les lacs et les secteurs côtiers et l'acidification des sols et des lacs. La principale source d'émissions atmosphériques d'azote au Canada est l'agriculture, mais les activités industrielles et les transports sont aussi des sources considérables (Chambers *et al.*, 2001).

Les eaux et les sédiments du Saint-Laurent contiennent de nombreux contaminants chimiques provenant surtout des affluents des grandes régions urbaines et industrielles. Les principales sources locales dans l'estuaire et le golfe sont les déchets urbains et

industriels ainsi que la remise en suspension de sédiments attribuable à des activités de dragage. D'autres contaminants sont introduits dans le système par voie atmosphérique et par les eaux de ruissellement provenant des activités agricoles et forestières du bassin versant du Saint-Laurent. Parmi les contaminants présents dans l'environnement marin, mentionnons des métaux lourds comme le mercure, le cadmium et le plomb, des composés organométalliques comme le tributylétain (TBT), des composés organiques bioaccumulables et persistants comme les organochlorés (BPC, DDT, mirex, toxaphène, dioxines et furannes), les organobromés (PBDE) et d'autres composés toxiques comme certains hydrocarbures (HAP), certains pesticides, des détergents et des produits pharmaceutiques. Ces contaminants se lient aux particules en suspension, c'est pourquoi les concentrations de contaminants sont plus élevées dans la zone de turbidité maximale (ZTM) de l'estuaire moyen, dans la section amont de l'estuaire maritime et dans le bassin intérieur du fjord du Saguenay. De plus, la proximité des secteurs urbains et industriels influe sur la concentration de contaminants dans les sédiments du Saint-Laurent. En effet, les particules plus lourdes sont déposées près de leur source tandis que les particules plus légères sont transportées sur de plus longues distances et sont déposées dans des endroits où les courants sont faibles. Dans les eaux peu profondes, des phénomènes physiques tels que les marées, les précipitations, les tempêtes et le mouvement des glaces, ainsi que des processus chimiques tels que l'adsorption de substances chimiques et la dégradation des molécules, favorisent une rediffusion continue des contaminants dans l'environnement (Dufour *et al.*, 2009). En amont du Saint-Laurent, le bassin des Grands Lacs est fortement urbanisé, industrialisé et agricole. Cependant, la majeure partie des substances toxiques rejetées dans ses eaux est piégée localement dans les sédiments. Dans une moindre mesure, le sud du Québec est également très industrialisé, urbanisé et agricole. Contrairement à ce qui se produit dans les Grands Lacs, une très faible proportion des substances toxiques qui atteint le fleuve Saint-Laurent et le moyen estuaire est piégée dans les sédiments. Ainsi, une grande part ne fait que transiter dans le couloir fluvial et le moyen estuaire pour être transportée jusqu'à l'estuaire maritime. Le sud du Québec constitue donc une des principales sources de contamination de l'estuaire (Gagnon, 1996).

Dans l'écosystème du Saint-Laurent, certains contaminants s'accumulent dans les tissus adipeux des organismes s'il s'agit de composés organiques, ou dans tous les tissus, s'il s'agit d'un métal, par un processus nommé bioaccumulation. De plus, certains

contaminants qui s'introduisent dans un organisme situé à la base de la chaîne alimentaire peuvent être transférés à des organismes de niveaux trophiques supérieurs via la prédation et devenir de plus en plus concentrés dans les tissus. C'est ce qu'on appelle la bioamplification. Plusieurs impacts inquiétants ont déjà été observés. Par exemple, la contamination aux métaux lourds de la baie Éternité en amont du fjord du Saguenay affecte la condition des myes. Des concentrations élevées de mercure, de plomb et de cadmium sont trouvées dans plusieurs secteurs. Le mercure est potentiellement immunotoxique, génotoxique et neurotoxique, alors que le plomb et le cadmium ont des effets sur les structures membranaires et musculaires et causent des déformations osseuses et des troubles hématologiques chez les poissons. De plus, la contamination par des produits organochlorés comme les BPC est soupçonnée d'avoir causé l'absence de recrutement chez l'anguille d'Amérique dans les années 1980, et de favoriser des désordres endocriniens, la formation de tumeurs et le dysfonctionnement du système immunitaire chez les bélugas. Pour leur part, les HAP sont potentiellement la cause des tumeurs au système digestif chez les bélugas et des lésions dans le foie des anguilles. De plus, l'exposition des embryons de poissons aux HAP peut causer des malformations et des mutations. En outre, les PBDE causent un dysfonctionnement de la thyroïde, des altérations neurologiques et de la toxicité neurocomportementale chez les poissons. Une autre source d'inquiétudes est le TBT et ses dérivés, qui peuvent endommager certains organes et systèmes hormonaux, causer des effets neurotoxiques, embryotoxiques, hépatotoxiques et immunotoxiques. Notamment, le TBT peut provoquer l'effet « imposex » chez les gastéropodes, c'est-à-dire l'apparition des caractères sexuels mâles chez les femelles, empêchant ainsi la reproduction. Dans le golfe et l'estuaire, une fréquence élevée de l'effet « imposex » a été observée chez les buccins. De plus, le TBT dans les sédiments aurait causé la mort ou inhibé le développement des larves de moules, jusqu'à leur disparition de certains sites. Le TBT serait aussi responsable du rapport des sexes biaisé en faveur des mâles chez les myes de la Baie Sainte-Catherine (Dufour *et al.*, 2009; Saulnier *et al.*, 2007).

Les suivis réguliers de la santé du fleuve indiquent que la contamination aux substances dites « classiques », comme les BPC et les métaux lourds, est en baisse marquée, mais que des contaminants émergents sont en hausse (Moreault, 2009). En effet, plusieurs substances utilisées aujourd'hui posent des risques inconnus pour la vie marine. Par exemple, les déchets urbains contiennent des molécules pharmaceutiques, des

hormones, des parasites, virus et bactéries pathogènes, constituant un cocktail pour le moins inquiétant (Dufour *et al.*, 2009; Gagnon, 1996; Moreault, 2009). Par exemple, les PBDE sont particulièrement préoccupants, car ils s'accumulent de plus en plus dans la graisse des bélugas (Dufour *et al.*, 2009). Les PBDE se retrouvent dans une vaste gamme de produits courants, tels que les téléphones, les ordinateurs et les produits textiles industriels. Ces substances présentent des propriétés semblables à celles des BPC, elles sont donc potentiellement toxiques, cancérogènes et perturbatrices du système endocrinien. Ces substances émergentes n'ont peut-être que des effets bénins individuellement et à court terme, mais une fois en synergie et intégrées dans la chaîne alimentaire, elles risquent de provoquer de graves impacts à long terme. L'émergence de nouveaux produits, tels que ceux issus de la nanotechnologie, est également à surveiller (Moreault, 2009).

Bien que naturellement présent et inoffensif dans les masses d'eau, le CO₂ est dorénavant en concentration menaçant l'équilibre chimique de l'écosystème. En effet, l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère favorise sa dissolution à la surface des océans, ce qui acidifie l'eau de mer. En fait, bien que le pH des océans soit demeuré relativement constant pendant plus de 20 millions d'années, il subit maintenant des changements très rapides, desquels on prévoit de graves conséquences pour la biodiversité marine dès la fin de ce siècle. Dans le Saint-Laurent, on constate une diminution importante du pH dans les eaux hypoxiques. Le pH à plus de 200 m de profondeur dans l'estuaire maritime s'établissait à environ 7,9 dans les années 1930, entre 7,75 et 7,8 dans les années 1980, et de 7,65 à 7,6 aujourd'hui. Ce changement représente une augmentation de 60 à 90 % de la concentration en ions d'hydrogène. Il est possible que l'augmentation de la respiration due au flux accru de matières organiques dans les eaux profondes ait aussi participé à la réduction du pH dans cette région. Cette diminution du pH a des répercussions majeures sur l'écosystème du Saint-Laurent. Presque tous les organismes calcifiants – les organismes phytoplanctoniques coccolithophoridés, les organismes zooplanctoniques ptéropodes et foraminifères, les échinodermes, les mollusques et les coraux – affichent une calcification moins importante dans des environnements d'une telle acidité. Des crustacés comme le crabe et certaines espèces de poissons sont également affectés par la baisse du pH. D'autre part, l'augmentation de l'acidité peut également altérer la spéciation chimique des éléments nutritifs et des métaux. Enfin, l'ampleur des impacts actuels et futurs demeure à ce jour méconnue (Dufour *et al.*, 2009).

Un tout autre type de contaminant à considérer est la pollution sonore. Naturellement, les vibrations terrestres, le craquement et la rupture des glaces, les vagues, les tempêtes et le vent contribuent au bruit ambiant. Les mammifères marins, les poissons et d'autres organismes produisent des sons pour communiquer, pour se nourrir et pour s'orienter. Toutefois, l'activité humaine génère elle aussi beaucoup de bruit, notamment l'exploration sismique, la navigation maritime, la construction en milieu marin et côtier, les sonars et les activités militaires. Les bruits intenses peuvent endommager les organes des animaux marins ou entraîner des changements comportementaux. Les mammifères marins peuvent éviter certains secteurs intéressants du point de vue écologique en raison du bruit. Il se peut également qu'ils soient attirés par certains sons et qu'ils s'exposent à des risques de collision avec des navires. Chez les baleines, le bruit peut aussi modifier les profils de migration, entraîner des troubles de l'ouïe, ou même effrayer mortellement certains individus qui peuvent remonter trop vite des profondeurs sans décompresser suffisamment. À long terme, l'intensification du bruit dans le golfe pourrait entraîner des changements dans les profils d'alimentation et de migration des animaux marins et rompre l'équilibre de l'écosystème (MPO, 2005).

2.1.2 Météorologie

L'écosystème de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent est fortement influencé par la variabilité des conditions océaniques et climatiques qui règnent dans l'Atlantique Nord (Dufour *et al.*, 2009). En fait, l'atmosphère agit sur la formation et la circulation des masses d'eau en influençant leur température et leur salinité. Les vents déplacent les eaux de surface et effectuent un transfert de chaleur dans la couche atmosphérique inférieure, ce qui influence notamment la formation de glace de mer. De plus, la nébulosité influence le réchauffement printanier et la température de la couche superficielle en été (MPO, 2005). Les températures de l'eau dans l'Atlantique Nord-Ouest sont également liées à l'état de l'oscillation nord-atlantique (ONA). Par exemple, l'indice ONA a connu une hausse sans précédent entre les années 1960 et 1990. Cette période fut donc marquée par des vents du nord-ouest plus puissants au-dessus du Labrador, un refroidissement de l'air et de la mer, ainsi que des glaces plus abondantes. Les changements climatiques planétaires exercent aussi des pressions sur les conditions de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (Dufour *et al.*, 2009). À ce sujet, le bassin Grands Lacs et Saint-Laurent a connu un réchauffement général de 0,7 °C au cours du dernier siècle (Robichaud et Drolet, 1998). Dans le golfe, la tendance au réchauffement moyenne observée est de

1,05 °C entre 1873 et 2008 à Charlottetown et de 2,4 °C entre 1876 et 1982 à Pointe-au-Père. De plus, on observe une variabilité interdécennale du climat d'amplitude plus grande (Dufour *et al.*, 2009; Robichaud et Drolet, 1998). La tendance à long terme observée dans les températures de l'air hivernales indique qu'il y a un réchauffement de 1,6 °C sur 135 ans à Charlottetown et de 2,4 °C par 100 ans à Pointe-au-Père. Les hivers deviennent donc plus doux, et ce, plus rapidement que les autres saisons (Dufour *et al.*, 2009; GC, 2008). Par ailleurs, un adoucissement des hivers et une « tropicalisation » des étés favorisent une évaporation accrue risquant de réduire la ressource en eau et de fragiliser les milieux humides, ajoutant un stress important à plusieurs espèces menacées (GC, 2008). Ces changements du climat ont également entraîné la diminution de la couverture de glace dans le golfe, ce qui menace la reproduction de certaines espèces comme le phoque (GC, 2008; PSL, 2008). En fait, on prévoit une réduction de 60 % de la durée des glaces de mer dans le golfe d'ici 2050 et leur disparition totale avant la fin du 21^e siècle (GC, 2008). Si la tendance se maintient et qu'aucune mesure de réduction des gaz à effet de serre n'est prise sérieusement, on prévoit également un réchauffement moyen de 3 °C le long du Saint-Laurent d'ici 50 ans (Robichaud et Drolet, 1998).

L'évaporation et les précipitations de pluie et de neige peuvent modifier la salinité de l'eau en surface (MPO, 2005). En raison des changements climatiques, les précipitations dans le sud du Québec et dans le golfe ont généralement augmenté et les « coups d'eau » sont de plus en plus nombreux et plus intenses (GC, 2008; Lapalme *et al.*, 2008). D'ici 2050, on prévoit une augmentation de 5 à 20 % des précipitations hivernales et 10 % des pluies printanières (Robichaud et Drolet, 1998). Plus l'eau tombe rapidement, moins elle a de possibilités de percoler, plus elle ruisselle avec force et plus elle entraîne de particules de sols dans sa course vers le Saint-Laurent. De plus, la pluie est légèrement plus chaude qu'auparavant, ce qui a des effets néfastes comme la perte d'oxygène dissous dans l'eau (Lapalme *et al.*, 2008).

Les changements climatiques peuvent aussi entraîner des modifications importantes du régime hydrologique du fleuve. L'augmentation des redoux hivernaux et la diminution de la quantité de neige ont pour effet d'étaler et de diminuer l'intensité des crues printanières, ainsi que de réduire le débit général du Saint-Laurent (Robichaud et Drolet, 1998). Cette diminution des apports en eau, combinée à l'augmentation de l'évaporation, a provoqué une baisse du niveau d'eau des Grands Lacs et du fleuve entre les années 1990 et 2001 (GC, 2008; PSL, 2008). Les bas niveaux observés lors des étés 1995, 1999 et 2001 ont

affecté la qualité de l'eau, la dynamique des milieux humides et les superficies des habitats aquatiques et riverains, notamment au lac Saint-Pierre (PSL, 2008; Robichaud et Drolet, 1998). De plus, les températures anormalement élevées et les bas niveaux d'eau ont causé une mortalité massive de poissons dans le tronçon fluvial en 2001 (PSL, 2008). Il est estimé que, dans la section fluviale, la quantité d'eau transitant du lac Ontario vers le Saint-Laurent sera réduite de 4 % à 24 % sur une base annuelle, causant une baisse de 20 cm à 1,2 m d'élévation dans le secteur de Montréal, selon le scénario. Cette baisse aura des conséquences sur la voie navigable. Pour maintenir les activités actuelles, il faudra augmenter le dragage et diminuer la capacité de chargement des bateaux. Il est important de préciser que le réchauffement climatique favorise une baisse du niveau de l'eau dans la section fluviale du Saint-Laurent, alors qu'il conditionne plutôt une augmentation du niveau d'eau dans l'estuaire et le golfe. En effet, les tendances à long terme indiquent que le niveau de la mer s'élève d'en moyenne 32,6 cm par siècle à Charlottetown, en raison d'un effet combiné de l'affaissement de la croûte terrestre dans le sud du golfe et de l'élévation du niveau d'eau mondial et régional (GC, 2008). Cependant, puisque la partie nord-ouest du golfe est en émergence, le niveau d'eau est en baisse, notamment à Sainte-Anne-des-Monts, Pointe-au-Père, Tadoussac et Sept-Îles. Le changement le plus marqué est une baisse de 8,8 cm par siècle observée à Saint-Jean-Port-Joli (Dufour *et al.*, 2009). Néanmoins, en se basant sur une hausse moyenne du niveau de la mer de 20 cm en 2050, il a été estimé que le taux net d'élévation sera de 14 cm à Québec et à Rimouski d'ici à 2050 (GC, 2008). Dans l'estuaire et le golfe, l'augmentation du niveau d'eau favorisera l'érosion des plages et des rives et le dépérissement des forêts riveraines (Robichaud et Drolet, 1998). Par ailleurs, la zone côtière est particulièrement sensible aux dommages écologiques de l'élévation du niveau de la mer en raison de la prédominance des zones basses des marais salés, de barrières littorales et les lagunes (GC, 2008). Cependant, ces hauts niveaux permettront d'accueillir des navires à plus fort tirant d'eau (Robichaud et Drolet, 1998). L'augmentation du niveau de la mer à l'échelle globale pourrait également déplacer vers l'ouest le front salin du Saint-Laurent, qui se trouve présentement à l'extrémité est de l'île d'Orléans. Outre les impacts écologiques, ceci pourrait causer une intrusion saline dans les nappes phréatiques présentement utilisées pour l'eau potable (GC, 2008; PSL, 2008; Robichaud et Drolet, 1998).

Dans la région maritime du Québec, on assistera vraisemblablement à une accentuation de l'érosion côtière le long de l'estuaire et du golfe en raison de l'élévation du niveau de la mer, la disparition progressive de l'englacement, la géologie de certaines côtes, l'augmentation des cycles gel-dégel et les régimes possiblement changeants des tempêtes (GC, 2008; PSL, 2008). Par ailleurs, les talus argileux de la Côte-Nord, ainsi que les falaises de grès friable des Îles-de-la-Madeleine et de la Baie des Chaleurs, sont sensibles à la gélifraction (GC, 2008).

2.1.3 Bassin versant

Le bassin versant désigne le territoire sur lequel les eaux de surface s'écoulent vers un même point appelé exutoire. Ce territoire est délimité par ce qu'on appelle la ligne de partage des eaux, c'est-à-dire les crêtes des montagnes et les dénivellations du terrain qui isolent le bassin versant du point de vue hydrologique. En effet, chacune des gouttes d'eau qui tombe et circule à l'intérieur des limites d'un bassin versant atteindra le même exutoire à la fin de son parcours (ROBVQ, 2010). Les caractéristiques de l'eau de l'exutoire seront donc influencées par les caractéristiques du bassin versant. En considérant que son bassin versant comprend les Grands Lacs, l'écosystème marin du Saint-Laurent reçoit plus de la moitié des apports d'eau douce de la côte atlantique de l'Amérique du Nord, tel qu'illustré à l'annexe 8 (Dufour *et al.*, 2009).

La géologie de la région maritime de ce bassin versant est composée d'une forte proportion de dépôts meubles friables, pouvant s'éroder facilement sous l'action des processus hydrodynamiques. La Côte-Nord est couverte de silts argileux postglaciaires surmontés de sables deltaïques reposant sur les formations granitiques du Bouclier canadien. Ces dépôts meubles, dont l'épaisseur peut atteindre une centaine de mètres, s'avancent dans le golfe et forment des deltas d'estuaires, des terrasses et des plages. Les formations rocheuses appalachiennes de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine sont constituées de grès et de schistes argileux s'érodant facilement, provoquant régulièrement des éboulements et des glissements de terrain. L'érosion de ces roches friables crée du sable et du gravier, à l'origine des plages et des flèches sableuses abritant des lagunes ou des barachois (GC, 2008).

À la frontière entre le milieu terrestre et le bassin hydrique du Saint-Laurent, la zone riveraine constitue la dernière protection naturelle des milieux aquatiques et marins. Les milieux humides ont des fonctions essentielles telles que le contrôle de l'érosion, la

régularisation des inondations et la filtration de l'eau. De plus, ces espaces servent de pouponnières et de sites de nidification, ainsi que d'aires d'alimentation et de repos fort utiles pour les poissons, les oiseaux, les amphibiens, les reptiles et les mammifères. Durant les quatre derniers siècles, environ les deux tiers des milieux humides des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent ont été perdus. La proportion atteint plus de 80 % dans les régions comme le sud-ouest de l'Ontario et la région de Montréal. Les milieux humides sont particulièrement vulnérables en raison du développement des régions urbaines et de la régularisation des niveaux d'eau (Ingram *et al.*, 2004). Dans l'estuaire, les grands marais côtiers abritent et servent de haltes migratoires à de nombreuses espèces animales. Par exemple, la majeure partie de la population mondiale de l'oie sauvage se concentre dans cette zone pendant les migrations bisannuelles. De plus, environ 65 % des marais côtiers de l'Atlantique ont été perdus depuis les années 1700 en raison de l'endiguement et du drainage pour l'agriculture et la colonisation du territoire, et plus récemment pour le développement industriel et les loisirs. En outre, le déclin de la zostère marine est associé à l'eutrophisation et à l'augmentation de la turbidité causées par la croissance des populations humaines côtières (GC, 2008).

2.1.4 Écosystème et biodiversité

L'estuaire et le golfe du Saint-Laurent affichent de grandes variations spatiales et temporelles des conditions environnementales et des processus océanographiques, offrant ainsi des conditions idéales pour une communauté biologique d'une diversité et d'une productivité élevées, telles qu'illustrées à l'annexe 9. En effet, le golfe du Saint-Laurent peut se diviser en deux zones distinctes : la partie sud, dominée par le Plateau madelinien, et la partie nord-ouest, où circule la gyre d'Anticosti. L'intrusion des eaux du plateau du Labrador favorise la productivité des espèces, car elle apporte des eaux riches en éléments nutritifs provenant de l'Arctique. De plus, la formation d'une couche hivernale bien mélangée amène les éléments nutritifs à la surface pour soutenir la prolifération du phytoplancton du printemps suivant (Dufour *et al.*, 2009). D'autre part, cet écosystème doit son unicité à la « pompe » à substances nutritives se trouvant à la tête du chenal Laurentien. Cette zone de remontée d'eaux profondes entraîne des quantités impressionnantes de sels nutritifs à la surface, ce qui favorise la croissance et la multiplication intenses des végétaux, ainsi que l'abondance des animaux qui en dépendent directement ou indirectement (Dufour *et al.*, 2009; Levasseur, 1996). Ces caractéristiques permettent des concentrations élevées de substances nutritives qui

soutiennent une production intense de phytoplancton dans le courant de Gaspé (Dufour *et al.*, 2009).

À la fin avril, après la fonte ou le retrait des glaces de mer, la stratification et l'intensité lumineuse augmentent. Survient alors une production de phytoplancton courte, mais intense et dominée par les diatomées. Les conditions environnementales optimales pour le déclenchement de cette prolifération majeure se présentent lorsque le débit des eaux de ruissellement de printemps diminue. La prolifération printanière qui survient dans l'estuaire maritime est retardée de quatre à huit semaines par rapport à celle du golfe. Le déclin de cette prolifération résulte de l'épuisement des nitrates dans la couche euphotique et de l'augmentation de la pression du broutage par le zooplancton. Deux ou trois proliférations par année sont généralement observées dans l'estuaire maritime et le courant de Gaspé. Une ou deux proliférations courtes et moins intenses ont lieu à la mi-mai et/ou à la mi-août. Une prolifération plus intense a lieu à la fin de juin ou au début de juillet. Pendant l'été et l'automne, les grandes cellules phytoplanctoniques et la biomasse mésozooplanctonique diminuent graduellement, mais les petites cellules phytoplanctoniques et le microzooplancton varient peu au cours de l'année. Pour ce qui est des algues toxiques, les proliférations dans l'estuaire maritime sont favorisées par une augmentation de la stratification, de la température et des substances nutritives dans la colonne d'eau ainsi que par une baisse de salinité dans les eaux de surface. Dans le Saint-Laurent, le principal organisme responsable de l'intoxication des mollusques est *Alexandrium tamarense*. Entre 1989 et 2008, on n'a relevé aucune tendance à la hausse quant à leur fréquence et leur intensité. Toutefois, les concentrations d'algues toxiques étaient anormalement élevées en 2008, démontrant qu'il s'agit bien de menaces potentielles pour la santé des espèces fauniques dans le Saint-Laurent, en particulier pour les espèces en péril (Dufour *et al.*, 2009).

Le phytoplancton constitue le premier maillon de la chaîne alimentaire marine. Il sert de nourriture de base à de nombreux organismes, tels que les mollusques bivalves, le zooplancton, les éponges et aux phases larvaires des crustacés et des poissons. Les autres organismes dépendent indirectement du phytoplancton puisqu'il nourrit leurs proies herbivores (Dufour *et al.*, 2009; MPO, 2005). Le phytoplancton joue également un rôle crucial dans le climat global de la terre, en séquestrant le carbone dans les eaux profondes par la « pompe biologique ». Le plancton est également un indicateur hautement sensible de la qualité écologique des mers. Le rapport entre les diatomées et

les dinoflagellés ou les flagellés peut constituer un bon indicateur de l'eutrophisation. En effet, l'abondance de ces deux types de phytoplancton est en relation directe avec les apports d'éléments nutritifs et la stratification de la colonne d'eau. À ce sujet, il y a eu une diminution générale des ratios diatomées/dinoflagellés et des diatomées/flagellés dans l'estuaire maritime depuis 1997. En effet, l'abondance des dinoflagellés et des flagellés a augmenté alors que celle des diatomées a diminué au cours de la même période (annexe 10). Une transition similaire a aussi été observée dans le nord-ouest du golfe et dans de nombreuses autres régions de l'Atlantique Nord. Ces changements peuvent être attribuables à l'augmentation des précipitations et des apports d'eau douce, des températures et des apports d'éléments nutritifs. La faune marine est fortement fonction de l'abondance du plancton et de sa composition. La dominance des dinoflagellés et des flagellés est remarquée en général dans les écosystèmes moins productifs, ce qui laisse présager un sombre avenir pour le Saint-Laurent (Dufour *et al.*, 2009). Les principales menaces du phytoplancton sont la pollution, l'aquaculture, la qualité de l'eau, les changements climatiques et les espèces introduites et envahissantes (MPO, 2005). En 2001, la diatomée *Neodenticula seminae*, une espèce du Pacifique Nord, a dominé la communauté de phytoplancton de l'estuaire et du golfe jusqu'à atteindre 80 % de la prolifération printanière. La présence de cette espèce dans l'Atlantique Nord peut être expliquée par la réduction récente de l'étendue et de l'épaisseur des glaces en été dans l'Arctique et par un flux accru de l'eau du Pacifique Nord dans l'Atlantique Nord-Ouest. Au fur et à mesure que la glace de l'Arctique poursuivra sa fonte, il est probable que d'autres introductions du Pacifique se produisent et que des impacts se fassent sentir sur la biodiversité et les pêches. D'autres espèces ont récemment été introduites dans le Saint-Laurent par un mode d'introduction encore inconnu, notamment le dinoflagellé toxique *Alexandrium pseudogonyaulax* observé depuis 2001 qui produit la goniodomine A et le dinoflagellé non toxique *Prorocentrum rhathymum* observé depuis 1999 (Dufour *et al.*, 2009).

Dans les écosystèmes marins, les organismes végétaux multicellulaires sont nommés macrophytes et se composent d'algues et de plantes vasculaires. Les algues servent de refuge à un grand nombre d'animaux marins et représentent une importante source de nourriture pour des organismes comme l'oursin et le bigorneau. La répartition des algues dépend des conditions ambiantes, telles que la température, la salinité, la teneur en nutriments, la profondeur, la composition du substrat, la lumière, les vagues, les courants

et les glaces. Le golfe abrite 21 espèces d'algues brunes telles que les laminaires, 16 espèces d'algues vertes dont la laitue de mer et 25 espèces d'algues rouges comme la mousse d'Irlande. Pour leur part, les graminées marines stabilisent le littoral grâce à leur système racinaire, améliorent la qualité de l'eau, servent de refuge et de garde-manger à un grand nombre d'espèces et stockent le carbone fixe. Dans le golfe, ces plantes se trouvent principalement dans les marais salés, les schorres et les herbiers de zostère. La récolte des macrophytes est très limitée dans le golfe du Saint-Laurent. Leurs principales menaces sont les espèces envahissantes, la perte d'habitat et la pollution (MPO, 2005).

Le zooplancton est composé de copépodes, d'euphausiacés (krill), de chétognathes, d'amphipodes et d'organismes gélatineux. La période de reproduction et de développement des copépodes est liée à la prolifération du phytoplancton. Dans le sud du golfe, la communauté de mésozooplancton affiche une dominance du genre *Calanus* au printemps et pendant une partie de l'été. À la fin de l'été et à l'automne, lorsque la population du genre *Calanus* entre en hibernation et se déplace dans les eaux plus profondes, la communauté évolue vers de petites espèces qui sont adaptées aux eaux de surface plus chaudes. La période de refroidissement des années 1990 est liée à l'augmentation de l'abondance de l'espèce de copépode *Metridia longa* et à la diminution de l'abondance de *Calanus finmarchicus* dans l'estuaire maritime. On a également observé une diminution de l'abondance de plusieurs espèces de krill, soit *Meganyctiphanes norvegica*, *Thysanoessa raschii* et *T. inermis* dans l'estuaire depuis 1994. En fait, la proportion de krill dans le zooplancton est passée de 80 à 40 % en moins de 10 ans. La réduction de la proportion de krill dans le sud du golfe est évidente depuis 1987, ce qui correspond à un phénomène général se produisant dans toutes les zones côtières du Canada atlantique. Dans le nord-ouest du golfe, l'espèce de copépode *Oithona similis* représente une forte proportion de la communauté, mais le genre *Calanus* est également considérablement abondant. Durant l'automne, les copépodes du genre *Calanus* et le krill présents dans les eaux profondes du chenal Laurentien sont transportés par les courants vers la tête du chenal Laurentien où les individus matures sont concentrés. Ce mécanisme crée ainsi la plus grande concentration de krill (*M. norvegica* et *T. rashii*) observée dans l'Atlantique Nord-Ouest. Tous les copépodes affichent des augmentations graduelles au printemps depuis 2001. On observe également des augmentations marquées pour les méroplancton, mésozooplancton et larves de krill depuis 2006. Pour ce qui est du macrozooplancton, l'abondance moyenne de *T. rashii* et

M. norvegica a diminué de 205 à 40 individus/m² et de 31 à 5 individus/m² respectivement de 1994 à 1996, et les niveaux sont demeurés très bas depuis. Un afflux d'espèces de l'Arctique, telles que l'amphipode *T. libellula* depuis le début des années 1990, a des conséquences inconnues. L'abondance et la production du zooplancton influent grandement sur la survie de l'ichtyoplancton et le recrutement des poissons. Par exemple, le recrutement élevé de maquereaux et de sébastes semble être lié à la forte production d'œufs de copépodes (Dufour *et al.*, 2009).

En ce qui concerne les invertébrés benthiques et nectoniques, la biomasse de près de 20 espèces de crevettes n'a cessé d'augmenter depuis le début des années 1980, en raison de la baisse de la prédation par les poissons de fond. De plus, la biomasse de bernards-l'hermite, de nombreux échinodermes tels que les étoiles de mer, les concombres de mer, des anémones, des éponges, de la patate de mer, a également généralement augmenté depuis la fin des années 1980. Cette soudaine abondance est également liée à la plus faible prédation des poissons benthivores, mais aussi à un rétablissement faisant suite à la réduction importante du chalutage dans le sud du golfe, ainsi qu'à une réaction au changement des conditions océanographiques. La biomasse des méduses s'est également accrue au cours de la même période, en raison de la baisse de la compétition et de la prédation, du changement climatique et de l'eutrophisation. L'espèce faisant l'objet de la pêche la plus importante des eaux hauturières du sud du golfe, le crabe des neiges, connaît plutôt des baisses d'abondance. En effet, l'abondance des femelles matures est quatre fois moins élevée qu'en 1990 et le nombre de grands mâles matures, cibles exclusives de la pêche, a atteint des niveaux relativement bas récemment (Dufour *et al.*, 2009).

On estime la diversité de la faune ichtyologique du golfe à 103 espèces. Dans la partie nord du golfe, les secteurs peu profonds de la côte ouest de Terre-Neuve-et-Labrador et la Côte-Nord du Québec constituent d'importants lieux d'alimentation et de croissance estivaux pour les poissons de fond et pélagiques. Les eaux profondes des chenaux et du plateau continental sont des aires d'alimentation, de frai, de croissance et d'hivernage pour un certain nombre de poissons comme la plie grise, la morue, le hareng, la plie, la merluche blanche et la raie épineuse. Dans le sud du golfe, le Plateau madelinien abrite d'importantes aires de frai, de croissance et d'alimentation pour de grandes biomasses de poissons de fond et de poissons pélagiques comme la morue et le hareng. Le côté ouest du Plateau madelinien englobe la principale frayère de morues du sud du golfe et du stock

septentrional de maquereaux de l'Atlantique Nord-Ouest. La structure et la dynamique des populations de poissons ont changé dramatiquement au début des années 1990. Les changements observés tant dans le nord que le sud du golfe ont suivi une période intense d'exploitation du poisson de fond, mais ces changements ont également coïncidé avec un afflux exceptionnel de l'eau froide en profondeur à partir d'environ 1990 à 1998. Bien que la température soit redevenue à son état antérieur, les changements dans les niveaux trophiques supérieurs ont persisté (Dufour *et al.*, 2009). Les changements les plus marqués se sont fait sentir chez la morue et le sébaste dans les années 1990, d'où la mise en place d'un moratoire sur la récolte de poissons de fond (MPO, 2005). Tel qu'illustré à l'annexe 11, l'abondance générale des piscivores, comme la morue et la merluche blanche, a diminué de façon spectaculaire, l'abondance des grands benthivores tels que la raie épineuse, la loquette d'Amérique et la plie canadienne a généralement diminué, alors que l'abondance des planctivores tels que le hareng, le capelan et le gaspareau, et celle des petits benthivores comme le chabosseau et la stichée affichent une tendance opposée. L'abondance marquée de ces espèces fourragères semble indiquer un effet en cascade de la prédation. Dans le nord du golfe, la structure de l'écosystème s'est déplacée d'une domination des poissons de fond comme la morue et le sébaste et les espèces fourragères de petite taille comme le capelan, le maquereau et le hareng à une structure dominée par les petites espèces fourragères. Malgré le moratoire sur la morue, la structure de l'écosystème n'est pas redevenue à son état antérieur. La niche écologique de la morue en tant que prédateur de capelan et de crevette a été remplacée par les mammifères marins et le flétan du Groenland (Dufour *et al.*, 2009). Dans le sud du golfe, les espèces de grande taille telles que la morue, la merluche blanche et la plie canadienne sont en déclin tandis que les taxons de petits poissons comme le chabosseau et la stichée ont une plus grande abondance. Malgré le moratoire, le stock de morue ne s'est pas rétabli et a même diminué au cours des dernières années, en raison d'une mortalité naturelle élevée. D'autre part, la population de hareng du sud du golfe se compose de deux groupes de reproducteurs, l'un frayant au printemps et l'autre à l'automne. La surpêche a affecté ces deux populations, mais le groupe d'automne s'est rétabli, alors que le groupe du printemps a diminué continuellement depuis les années 1990 en raison d'un faible taux de recrutement. De plus, d'importantes baisses d'effectifs ont été enregistrées chez trois espèces de loups de mer et deux populations de morues. Le loup à tête large et le loup tacheté sont des espèces menacées listées dans la *Loi sur*

les espèces en péril (LEP). Le loup atlantique a été classé espèce préoccupante par le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) en 2000, et il est inscrit à la LEP. La morue nord-laurentienne a été désignée menacée et celle des Maritimes a été désignée préoccupante par le COSEPAC. La tortue luth est le seul reptile connu dont l'aire de répartition englobe le golfe du Saint-Laurent, et malheureusement, cette espèce est en voie de disparition d'après le COSEPAC et la LEP (MPO, 2005).

Pour ce qui est des mammifères marins, six espèces de phoques fréquentent les eaux de la côte atlantique du Canada : phoques du Groenland, gris, commun, à capuchon, annelé et barbu. La plupart des phoques qui font l'objet d'une chasse commerciale sont des phoques du Groenland et des phoques gris. Le phoque du Groenland est le plus abondant pinnipède au Canada atlantique, comptant une population d'environ 5,8 millions d'individus dont près du tiers naissent dans le golfe. La population de phoque gris est estimée à 52 000 dans le golfe, représentant environ 20 % de la population totale de l'Atlantique Nord-Ouest. Ces troupes ont connu une croissance exponentielle depuis les années 1970 et continuent à s'accroître d'environ 12 % par année. Le phoque commun est le moins abondant. Seuls 4 000 à 5 000 individus, soit le tiers de la population totale du Canada, fréquentent le Saint-Laurent. La population de phoque à capuchon est en croissance, mais seul un faible pourcentage se reproduit dans le golfe. Les phoques annelé et barbu font l'objet d'observations occasionnelles dans l'estuaire et le golfe (Dufour *et al.*, 2009).

Le golfe est fréquenté par cinq espèces de baleines à fanons, à savoir le rorqual commun, le petit rorqual, le rorqual bleu, le rorqual à bosse et la baleine noire de l'Atlantique Nord, et par huit espèces de baleines à dents, soit le béluga, le globicéphale, le dauphin à flancs blancs, le dauphin à nez blanc, le marsouin commun, la baleine à bec commune, l'épaulard et le grand cachalot (MPO, 2005). Seules quelques centaines de rorquals communs fréquentent le golfe du Saint-Laurent. Cette population est désignée préoccupante selon le COSEPAC. Les rorquals font face à de nombreuses menaces, incluant les collisions avec les navires et l'enchevêtrement dans des engins de pêche. Le stock de petit rorqual de la côte Est du Canada est estimé à environ 4 000 individus, dont un quart ou plus seraient des résidents du golfe du Saint-Laurent. Le rorqual bleu fréquente l'estuaire et le golfe pendant les mois sans glace. Il est improbable qu'il ne reste plus que quelques centaines d'individus de cette population. Il n'y a que 20 à 105 individus observés par année dans l'estuaire et le nord-ouest du golfe. Le rorqual bleu est désigné

espèce en péril selon le COSEPAC. La population de rorqual à bosse de l'Atlantique nord-ouest était désignée menacée en 1982 par le COSEPAC, mais a été classée « non en péril » en 2003. En effet, on observe une augmentation de la fréquentation de ces rorquals dans le Saint-Laurent depuis la fin des années 1990. La baleine noire de l'Atlantique Nord est en voie de disparition, car il ne resterait que 325 individus et cette espèce est très susceptible d'entrer en collision avec des bateaux. La population de bélugas sédentaire dans l'estuaire du Saint-Laurent est stable depuis 1988 et compte 1 000 à 2 000 individus. Cette espèce est désignée menacée selon le COSEPAC, car les bélugas et leur habitat sont menacés par les contaminants, le trafic maritime et l'industrialisation du bassin versant. Le globicéphale fréquente régulièrement le sud du golfe et sa population n'est pas en péril selon le COSEPAC. Le nombre de dauphins à flancs blancs qui fréquentent le golfe varie beaucoup d'une année à l'autre, avec des observations de 500 à 12 000 individus dans ce secteur. Les populations de dauphins à flancs blancs et à nez blanc ne sont pas en péril d'après le COSEPAC. La population de marsouin commun du golfe compterait de 36 000 à 125 000 individus pendant la période estivale. Cette espèce est désignée préoccupante selon le COSEPAC car elle est susceptible à l'enchevêtrement mortel dans les filets de pêche. La baleine à bec commune est en voie de disparition, car sa population ne compterait plus que 130 individus. La taille de la population d'épaulards est estimée à moins de 1 000 individus, mais seuls quelques individus font l'objet d'observations occasionnelles dans le Saint-Laurent. Cette espèce est désignée préoccupante selon le COSEPAC en raison de la chasse dans les eaux du Groenland, des perturbations acoustiques et physiques et des contaminants. Le grand cachalot fait l'objet de rares observations dans l'estuaire et le golfe, mais sa population ne serait pas en péril selon le COSEPAC (Dufour *et al.*, 2009).

Le golfe du Saint-Laurent sert d'habitat à environ 18 espèces d'oiseaux marins nicheurs, dont des oiseaux côtiers tels que les cormorans, les goélands et les sternes. Le golfe est aussi utilisé par des oiseaux extracôtiers ou pélagiques comme les pétrels et les pingouins. Ces communautés d'oiseaux marins ont connu des changements importants en raison de l'exploitation des ressources marines par les humains. Au cours des 20 dernières années, les populations d'oiseaux extra côtiers ont augmenté considérablement, tandis que les populations d'oiseaux côtiers ont connu un déclin (MPO, 2005). Les populations des colonies de fous de Bassan dans le golfe se sont accrues rapidement depuis les années 1950. Au cours des 30 dernières années, les petits pingouins ont vu

leur population s'accroître dans tout le golfe, notamment grâce à la diminution radicale de la pêche au filet maillant et des prises accessoires. Les populations de mouettes tridactyles et de guillemots marmettes ont affiché un déclin depuis 1990, en raison d'une baisse du succès de reproduction causée par l'augmentation de la prédation des goélands argentés (Dufour *et al.*, 2009; Saulnier *et al.*, 2007). En fait, ces derniers ont aussi éprouvé une baisse du succès de la reproduction à cette époque, en conséquence de la perturbation d'eaux froides de 1990 qui a affecté leur principale proie, le capelan (Dufour *et al.*, 2009). Il y a aussi 18 espèces de sauvagine dans le golfe, dont les eiders et les macreuses, et de nombreuses espèces d'oiseaux de rivage. La majorité des oiseaux de rivage font halte dans le golfe pour se nourrir dans les battures pendant leur migration entre l'Arctique et l'Amérique du Sud (MPO, 2005).

2.2 Description des activités humaines

L'emplacement géographique et les caractéristiques physiques du Saint-Laurent en font un atout économique majeur pour le Québec, le Canada et le cœur industriel des États-Unis. On estime à 165 milliards de dollars sur 20 ans la valeur économique de ses différents usages, incluant le transport maritime, la pêche commerciale, les activités industrielles et les activités récréatives (PSL, 2008). Des centaines de milliers de résidents des cinq provinces riveraines du golfe du Saint-Laurent dépendent de ses ressources pour leur gagne-pain (MPO, 2005). Toutefois, l'écosystème marin du Saint-Laurent est exposé à une vaste gamme d'activités humaines qui posent des menaces importantes à son intégrité et à son utilisation durable. Les principales pressions humaines dans l'estuaire et le golfe sont la pollution sonore du transport maritime, les espèces exotiques envahissantes, la destruction et la modification des habitats, l'ajout de nutriments et de contaminants et la modification des apports d'eau douce (Dufour *et al.*, 2009).

2.2.1 Navigation, pêcheries et aquaculture

Le Saint-Laurent est le site d'une navigation intensive, car la Voie maritime du Saint-Laurent et le golfe forment un important corridor maritime qui relie le centre et l'est du Canada aux marchés internationaux (Dufour *et al.*, 2009; MPO, 2005). Chaque année, quelque 6 400 navires marchands traversent le détroit de Cabot. Le détroit de Belle-Isle constitue une voie maritime saisonnière, de juin à janvier, pour le commerce avec les pays européens. Les gros navires transportent une grande variété de marchandises, notamment des produits pétroliers, du minerai, des produits chimiques, des produits

forestiers ainsi que des céréales. Divers autres navires circulent aussi dans le golfe et l'estuaire, dont des traversiers à passagers, des transbordeurs à véhicules, des remorqueurs et des barges, des paquebots de croisière, des bateaux de plaisance, des navires d'excursion aux baleines et des bateaux de pêche commerciale. Cette industrie contribue grandement à l'économie des collectivités côtières et du Canada tout entier. Cependant, la densité du trafic maritime suscite certaines craintes quant à la sécurité maritime ainsi qu'à la protection des écosystèmes marins. En effet, les navires rejettent continuellement des contaminants dans l'environnement par leurs déchets, leurs eaux de cale ou leurs eaux de lest. En outre, plusieurs espèces envahissantes auraient été introduites dans le golfe par les eaux de ballast des navires (MPO, 2005). Des impacts additionnels sont à venir si le niveau d'eau du Saint-Laurent baisse en raison des changements climatiques et des conflits d'usage pour la ressource en eau. Pour maintenir les activités maritimes malgré un tel scénario, il est théoriquement réalisable de réorganiser le transport maritime et ses infrastructures, ou d'adapter les navires afin de minimiser le tirant d'eau requis, mais cela paraît difficile à appliquer dans un contexte d'échanges économiques croissant et des investissements majeurs requis pour une telle réorganisation, estimés entre 260 millions et 1 milliard de dollars. Une autre option serait d'adapter le milieu physique par du dragage et des ouvrages de régularisation. Par contre, cela occasionnerait des répercussions environnementales considérables. De plus, l'industrie maritime devrait assurer les coûts de mesures de compensation difficiles à mesurer avec précision (GC, 2008).

L'estuaire et le golfe font l'objet d'une pêche commerciale intensive (Dufour *et al.*, 2009). Cependant, depuis l'instauration du moratoire sur la pêche du poisson de fond au début des années 1990, cette industrie a évolué vers un certain nombre d'espèces jusqu'à sous-exploitées. Même si la pêche du poisson de fond comme le flétan du Groenland demeure une activité importante, les invertébrés tels que les crevettes, le crabe des neiges, le homard, la mye et le pétoncle, et les espèces pélagiques comme le hareng, le maquereau et le capelan dominant aujourd'hui les débarquements. Tel que présenté à l'annexe 9, le poisson de fond représentait 24 % de la valeur au débarquement de l'ensemble des captures en 1990-1991, alors que ce pourcentage est passé à 5 % pour la période de 1997 à 2001. Les invertébrés représentaient les deux tiers de la valeur au débarquement de 1990-1991, et près de 90 % entre 1997 et 2001 (MPO, 2005). La pêche commerciale dans l'estuaire est moins importante que dans le golfe, on dénombre

néanmoins sept ports de pêche et 11 usines de transformation du poisson. Le crabe des neiges est une espèce très lucrative qui représentait à elle seule 67,5 % de la valeur de l'ensemble des débarquements dans l'estuaire en 1995, soit 19,6 millions de dollars (Gagnon, 1996). Toutefois, les revers de la pêche commerciale incluent la destruction de l'habitat benthique, car presque tous les recoins du golfe où l'eau fait moins de 165 m de profondeur ont été creusés par les chaluts et les dragues à pétoncle. De plus, les prises accessoires et l'enchevêtrement dans les filets affectent notamment les marsouins et les rorquals (MPO, 2005).

La chasse aux phoques est pratiquée dans les provinces de l'Atlantique. Les captures de phoques du Groenland augmentent de façon continue depuis le début des années 1960, mais le recrutement de la population dépasse toujours le nombre d'individus récoltés. Pour sa part, la chasse au phoque gris se limite à une récolte traditionnelle à faible échelle au large des Îles de la Madeleine. Depuis quelques années, des permis de chasse au phoque à des fins personnelles sont délivrés à des particuliers qui habitent près de territoires de chasse historiques à Terre-Neuve-et-Labrador, sur la Côte-Nord, en Gaspésie et aux Îles de la Madeleine (MPO, 2005).

Le bouleversement de l'industrie de la pêche a fait naître un intérêt soutenu pour l'aquaculture, une industrie prospère, mais potentiellement risquée pour la santé de l'écosystème marin si elle n'est pas gérée adéquatement. Dans le golfe, l'activité aquacole est dominée par l'élevage des mollusques, principalement l'huître et la moule bleue. La région compte quelque 1 800 exploitations aquacoles, dont 96 % sont concentrées au Nouveau-Brunswick, en Nouvelle-Écosse et à l'Île-du-Prince-Édouard (MPO, 2005). Les cultures de mollusques et de poissons produisent de larges quantités d'excréments qui se décomposent dans la colonne d'eau ou sur le fond, rejetant ainsi des nutriments qui stimulent la croissance algale. Les régions peu profondes, où l'eau est peu renouvelée et où l'aquaculture est intensive, peuvent favoriser la croissance d'espèces toxiques (Anderson *et al.*, 2002; Sellner *et al.*, 2003). En effet, plusieurs régions du monde où des floraisons toxiques se sont récemment étendues sont des zones fortement utilisées pour de l'aquaculture (Van Dolah, 2000).

La cueillette artisanale des mollusques, surtout des myes communes, est pratiquée par plusieurs riverains sur les deux rives du Saint-Laurent, à partir de l'île aux Coudres sur la rive nord et de Saint-Roch-des-Aulnaies sur la rive sud, ainsi que dans la baie des

Chaleurs et aux îles de la Madeleine. Pour la seule région de Baie-Comeau, on estime que plus d'un millier de personnes s'adonnaient à cette activité (Gagnon, 1996; Duchesne, 2000). Les eaux usées provenant des municipalités ou des résidences isolées sont la principale source de contamination bactérienne des secteurs coquilliers de l'estuaire et du golfe. Depuis 1992, d'importants efforts ont été réalisés pour contrôler ces sources de contamination et améliorer la qualité bactériologique des 254 secteurs coquilliers du Québec. En 2005, 130 secteurs demeuraient fermés à la cueillette des mollusques en raison d'une contamination bactérienne persistante (PSL, 2008). Il est à noter que bien que les industries de la pêche et de l'aquaculture peuvent affecter considérablement l'écosystème, il est capital de reconnaître que ces activités ne peuvent survivre sans un environnement marin propre, sain et durable (MPO, 2005).

2.2.2 Agriculture et élevage

En 2000, les recettes monétaires agricoles des quatre provinces de l'Atlantique et du Québec totalisaient 7,5 milliards de dollars, et le Québec représentait 80 % de ce total (MPO, 2005). Les activités agricoles se concentrent essentiellement dans le sud du Québec. Guidées par différents facteurs socio-économiques, les superficies cultivées ont diminué depuis 1941, passant de 2,5 à 1,8 million d'hectares en 2001 (annexe 12) (GC, 2008; MDDEP, 2004). En effet, la spécialisation et l'intensification des productions animales et végétales ont contribué à la réduction du nombre de fermes et de la superficie totale des terres cultivées, mais aussi à la nette augmentation de la productivité. De plus, les superficies consacrées aux grandes cultures, comme le maïs et le soya, ont augmenté au cours de cette période, et ce, au détriment d'utilisations agricoles moins exigeantes quant à l'usage des engrais et des pesticides, comme les fourrages, les pâturages et les céréales (MDDEP, 2004). En 2001, le maïs couvrait à lui seul 26,4 % du territoire cultivé du Québec, et près de 56 % des superficies en maïs se trouvaient dans les bassins versants des rivières Yamaska et Richelieu (MDDEP, 2004). En outre, les charges en azote total et en phosphore total attribuées aux activités agricoles sont évaluées entre 50 et 75 % du flux net à l'embouchure des rivières Yamaska, L'Assomption, Chaudière et Boyer (Bouchard et Roy, 1999). Telle qu'illustrée à l'annexe 12, l'utilisation des engrais azotés et phosphorés par les agriculteurs québécois a beaucoup augmenté depuis le début des années 1960. Cependant, l'emploi d'engrais phosphorés est à la baisse depuis le début des années 1990, coïncidant avec l'accroissement de la culture du maïs qui nécessite surtout des engrais à base d'azote (MDDEP, 2004). D'autre part, l'élevage

d'animaux génère annuellement des milliards de tonnes de déjections riches en substances nutritives dont les répercussions environnementales sont importantes (Chevalier, 1996). Entre 1971 et 2001, les cheptels avicoles et porcins ont augmenté considérablement, entraînant une hausse des quantités de fumiers et de lisiers produites par les exploitations agricoles. L'industrie porcine est concentrée dans les bassins versants des régions de la Montérégie, de Chaudière-Appalaches et du Centre-du-Québec, représentant ensemble 78 % du cheptel de la province en 2001 (MDDEP, 2004). Les affluents de ces régions entraînent donc une pollution non négligeable du fleuve Saint-Laurent (Moreault, 2009).

Les quantités d'engrais azotés utilisées au Canada seraient responsables de 80 % des quantités d'azote rejetées dans l'environnement, directement dans les sols et l'eau ou indirectement sous forme de précipitations d'ammoniac (Greenpeace, 2008). Dans le Saint-Laurent, les apports agricoles contribueraient autant, sinon plus, que les rejets municipaux à la charge de phosphore anthropique (Bouchard et Roy, 1999). En augmentant les superficies des types de cultures qui laissent le sol exposé, comme les monocultures de maïs, les activités agricoles augmentent le ruissellement, l'érosion des sols et le risque de contamination microbiologique et organique des eaux de surface (Anderson *et al.*, 2002; Chevalier, 1996; GC, 2008; MDDEP, 2004). De plus, les parcelles de terres agricoles qui restent sans végétation durant plusieurs semaines se réchauffent davantage qu'un sol ayant un couvert végétal. L'eau qui y ruisselle se réchauffe donc aussi plus vite avant d'atteindre les cours d'eau (Lapalme *et al.*, 2008). De plus, le drainage des sols et le redressement des petits cours d'eau ont grandement altéré l'intégrité des écosystèmes aquatiques (Chevalier, 1996; MDDEP, 2004). Même si elles sont situées à plusieurs kilomètres d'un cours d'eau, les parcelles agricoles libèrent des nutriments, des pesticides et des bactéries fécales qui sont ensuite transportés par le ruissellement jusque dans le bassin le plus bas de la région (Lapalme *et al.*, 2008). Par ailleurs, l'annexe 13 indique les principaux lieux où des signes d'enrichissement agricole ont été observés dans le bassin versant des Grands Lacs et du Saint-Laurent (Chambers *et al.*, 2001). Les apports agricoles surviennent principalement lors des crues d'automne et de printemps, au cours desquelles les matières en suspension sont charriées jusqu'au milieu marin (Bouchard et Roy, 1999). Étant donné le pouvoir de dilution et la dynamique particulière du fleuve, on doit constater que la pollution d'origine agricole affecte plus fortement les rivières tributaires que le Saint-Laurent. Toutefois, si la saturation des sols

en nutriments se poursuit dans les bassins agricoles, ces apports pourraient avoir une incidence beaucoup plus grande sur l'eutrophisation du Saint-Laurent, en particulier dans le secteur du lac Saint-Pierre (Bouchard et Roy, 1999; MDDEP, 2004; Solow, 2004). Néanmoins, une partie importante du territoire des municipalités riveraines de la rive sud de l'estuaire est vouée à l'agriculture, et cette activité contribue déjà à la contamination organique, fertilisante, microbienne et toxique des zones littorales (Gagnon, 1996; MPO, 2005).

2.2.3 Exploitation des ressources naturelles

La superficie du territoire public québécois destiné à la production forestière est de 265 211 km², ce qui représente environ 17 % de la province. L'exploitation forestière entraîne plusieurs impacts pour les écosystèmes, notamment sur la biodiversité et la qualité de l'eau (GQ, 2010). Dans le cas des coupes à blanc, les sols sans protection se réchauffent et les eaux qui y ruissellent deviennent sensiblement plus « chaudes » puis s'écoulent dans les cours d'eau (Lapalme *et al.*, 2008). Un couvert végétal permet de capturer l'eau de pluie, de favoriser la percolation et de réduire le ruissellement et la solubilisation des substances humiques (Gagné, 2010). Le passage de la machinerie lourde perturbe la structure du sol qui favorise la migration des sédiments et des acides humiques vers les cours d'eau (Gagné, 2010; Lapalme *et al.*, 2008).

Le substrat rocheux et les sédiments du golfe abritent d'abondantes ressources, telles que le sable, le gravier, les sables siliceux et les minéraux lourds comme l'or, le fer et le titane. Dans l'est du Canada, il y a de la production de chlorure de sodium (sel) par évaporation d'eau salée. Sur le pourtour du golfe, un peu plus de 35 entreprises du secteur minier sont en exploitation au Québec, au Nouveau-Brunswick, en Nouvelle-Écosse et à Terre-Neuve-et-Labrador. L'Île-du-Prince-Édouard compte un faible nombre d'installations de production d'agrégats et de tourbe (MPO, 2005).

Le golfe est riche en combustibles fossiles, comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel et les hydrates de gaz. Des zones situées au large de Terre-Neuve-et-Labrador et de la Gaspésie au Québec présentent un attrait potentiel pour l'industrie pétrolière et gazière. L'exploration pétrolière et gazière est pratiquée depuis plus de 160 ans dans les cinq provinces qui bordent le golfe du Saint-Laurent. Cette industrie devrait s'intensifier dans le golfe en raison de la hausse des prix du pétrole, du repli prévu de l'offre de pétrole et de gaz de qualité supérieure provenant de l'Ouest canadien ainsi que de la signature de

nouvelles ententes de partage des recettes entre le gouvernement du Canada et les gouvernements de Terre-Neuve-et-Labrador et de la Nouvelle-Écosse. Un tel scénario est une source d'inquiétudes, car il existe de nombreux impacts connus sur les écosystèmes marins. L'exploration peut provoquer des changements des profils migratoires des baleines ou des comportements d'évitement qui pourraient nuire aux excursions d'observation des baleines et à l'industrie du tourisme en général. Des fuites d'huiles, même mineures, peuvent souiller des plages et causer des mortalités d'animaux. On prévoit aussi des impacts sur la pêche commerciale et les exploitations aquacoles, tels que des équipements encrassés par des salissures, la perte de lieux de pêche ou d'exploitation, et la contamination de certaines espèces (MPO, 2005).

Le secteur de l'estuaire maritime est une des régions du Québec les plus productives en électricité. On compte présentement près d'une vingtaine de centrales hydroélectriques sur les tributaires de l'estuaire, en plus de celles du fleuve Saint-Laurent et de la rivière Saguenay. L'aménagement de barrages hydroélectriques sur plusieurs tributaires du Saint-Laurent a considérablement réduit les variations saisonnières des apports d'eau douce dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent. On estime en effet qu'à partir de 1970, l'amplitude des fluctuations saisonnières de ce débit a été réduite de moitié. De nos jours, les apports d'eau douce du Saguenay et des grandes rivières de la Côte-Nord se font surtout sous la forme de courtes pointes de débit qui n'ont plus rien à voir avec le cycle annuel naturel. Il est possible que ces changements aient entraîné une diminution de la productivité du milieu en diminuant l'intensité de la circulation estuarienne. Dans les estuaires des rivières Manicouagan et aux Outardes, un nouvel équilibre du régime sédimentologique et hydrodynamique et des communautés benthiques s'est établi depuis le harnachement de ces cours d'eau. Par ailleurs, on soupçonne que le harnachement de ces rivières est responsable de la quasi-disparition de l'esturgeon noir dans la région et de l'abandon du secteur des bancs de la Manicouagan par le béluga. Ces barrages constituent aussi des barrières infranchissables par les poissons anadromes (Gagnon, 1996).

2.2.4 Développements urbains et industriels

Environ 50 % de la population du Canada et de grandes superficies agricoles se trouvent dans le bassin Grands Lacs et Saint-Laurent (Ingram *et al.*, 2004). Une forte croissance de la population crée une augmentation de l'aménagement du territoire dans ce secteur,

malheureusement accompagné de signes d'enrichissement urbains et industriels, tels qu'illustrés par l'annexe 13 (Chambers *et al.*, 2001; Ingram *et al.*, 2004). Au Québec, les municipalités riveraines du Saint-Laurent regroupent plus de 60 % de la population. La région métropolitaine de Montréal représente à elle seule près de 50 % de la population et plus de 43 % des établissements industriels et commerciaux (Bernier *et al.*, 1998; GC, 2008). À ce sujet, l'annexe 14 présente les zones de densité humaine du Québec en 2001 (MDDEP, 2004). Considérant que 65 % de la population du Québec vit dans des bassins versants urbains et 32 % dans des bassins modérément urbains, la pression exercée sur ces milieux accroît la vulnérabilité de la ressource en eau (GC, 2008). En effet, l'urbanisation influence grandement la qualité et la quantité des eaux de surface. Par exemple, les surfaces piétonnières, les stationnements, les rues et les toits sont des surfaces imperméables qui, exposées au soleil, sont devenues autant de capteurs d'eau chaude. De plus, les engrais épandus sur les pelouses résidentielles sont lessivés par les eaux de pluie, qui prennent le chemin des égouts pluviaux et se déversent directement dans les cours d'eau ou le fleuve, à des kilomètres de la source polluante. Qu'il s'agisse de travaux d'excavation, de construction domiciliaire ou commerciale, de routes, de ponts, d'aménagement paysager ou encore de piste de véhicules tout-terrain, si aucune mesure de contrôle n'est appliquée, des sédiments chargés en phosphore sont automatiquement acheminés dans les cours d'eau du bassin versant (Lapalme *et al.*, 2008). Il est également intéressant de comparer le cycle naturel de l'eau entre un bassin versant naturel et un bassin versant urbanisé. En milieu naturel, du 100 % des précipitations, 40 % de l'eau est évapotranspirée, 50 % atteint les eaux souterraines, et seulement 10 % ruisselle en surface, tandis qu'en milieu urbanisé, 15 % est évapotranspirée et 10 % atteint les eaux souterraines, donc 75 % ruisselle en surface vers les cours d'eau. De plus, les structures urbaines font augmenter la vitesse de ruissellement, ainsi que le débit de pointe des cours d'eau, ce qui augmente l'érosion des berges, accroît les risques d'inondations et induit une dégradation de la qualité de l'eau (Bernier *et al.*, 1998; Lapalme *et al.*, 2008). Par ailleurs, l'érosion est considérée comme une préoccupation « majeure », notamment entre Montréal et le lac Saint-Pierre, où le recul des rives est de 80 cm par année en moyenne depuis le début des années 1980 et atteint jusqu'à 3 m par an aux îles de Boucherville et de Berthier-Sorel (Moreault, 2009). Précisément dans la région maritime du Québec, plus de 35 % des 400 000 résidents vivent à moins de 500 m des berges du Saint-Laurent, et plus de 90 % vivent à moins de 5 km. En effet, la plupart des villages côtiers ont été bâtis

sur les dépôts friables qui bordent les côtes et les principales industries dépendent d'infrastructures telles que les routes provinciales et les ports, et des ressources situées dans la zone côtière. Les technologies utilisées pour construire sur les berges consistent généralement en des enrochements linéaires et l'érection de murs verticaux causant des répercussions environnementales importantes, notamment un déficit en matériel granulaire. Sur la Côte-Nord, près de 40 % des talus actifs ont été enrochés. Ces ouvrages de « protection » réduisent de moitié les apports de sable issus de l'érosion des talus protégés, ce qui a pour effet de provoquer l'affaissement des plages et l'augmentation de l'érosion des talus non protégés. Le déboisement des berges, la destruction de la végétation des dunes par le passage de véhicules tout-terrain, les infrastructures côtières telles que les jetées, les quais et les chenaux artificiels, ainsi que les égouts pluviaux municipaux peuvent également modifier la dynamique sédimentaire et agir sur l'érosion des berges (GC, 2008). De plus, parmi les sols meubles qui constituent la moitié du littoral de la Côte-Nord, 60 % sont en voie d'érosion (Moreault, 2009).

Au Québec, la plupart des grandes collectivités épurent leurs eaux usées. Cependant, un grand nombre de petites localités, surtout en Gaspésie et dans la Basse-Côte-Nord, n'ont aucune installation d'épuration. Dans l'ouest de Terre-Neuve-et-Labrador, les stations d'épuration sont rares et de nombreuses collectivités déversent leurs eaux usées brutes dans la mer. La majorité des collectivités du Nouveau-Brunswick soumettent leurs eaux usées à une forme d'épuration. À l'Île-du-Prince-Édouard, 16 % de la population n'est pas desservie par une station d'épuration des eaux usées. En Nouvelle-Écosse, environ 75 % des collectivités des comtés de Colchester, de Cumberland et de Pictou ont un système d'épuration, mais cette proportion baisse à moins de 25 % dans les comtés d'Antigonish et d'Inverness (MPO, 2005). Malgré tout, plusieurs installations sont désuètes ou mal conçues en raison de contraintes économiques qui limitent le nombre ou l'envergure des traitements (Lapalme *et al.*, 2008). Dans une eau usée municipale typique, la demande biologique en oxygène (DBO) varie habituellement entre 100 et 300 mg d'oxygène consommé par litre d'eau (mg/L), alors qu'elle ne devrait pas dépasser 3 mg/L pour permettre la survie des poissons les plus sensibles à la pollution (Chevalier, 1996). De plus, dans plusieurs municipalités, les conduites pluviales et les égouts sanitaires sont combinés. Après une forte pluie, le volume des eaux usées dépasse la capacité de traitement de l'usine. Dans ces conditions, les eaux usées sont déversées dans les cours d'eau sans aucune forme de traitement (Lapalme *et al.*, 2008). À titre d'exemple, la

contamination bactériologique attribuable aux rejets des stations de Montréal, Longueuil et Repentigny et aux débordements des réseaux d'égouts par temps de pluie est perceptible jusqu'à Bécancour, près de Trois-Rivières (Saulnier *et al.*, 2007).

En 1995, quelque 14 950 industries québécoises, appartenant à des secteurs industriels variés, tels que l'agroalimentaire, la transformation des métaux, les textiles, la transformation du bois, les pâtes et papiers, la métallurgie primaire et le raffinage du pétrole, émettaient des rejets à l'eau, à l'air ou au sol (MDDEP, 2004). Par exemple, le Québec et les quatre provinces de l'Atlantique comptent près de 80 usines de pâtes et papier, dont près de 20 sont établies à proximité du golfe et de l'estuaire. Les usines utilisent et rejettent de l'eau dans l'exercice de leurs activités quotidiennes, et ces effluents peuvent avoir des impacts sur l'écosystème, tels que le rejet de matières organiques et de débris flottants, l'appauvrissement de la teneur en oxygène et la libération de composés toxiques. Ils peuvent également avoir des conséquences fâcheuses pour d'autres industries, telles que le tourisme (MPO, 2005).

Dans la région du golfe du Saint-Laurent, le tourisme connaît une croissance fulgurante depuis 10 ans. L'estuaire possède plusieurs établissements d'hébergement et des emplacements de camping. Les rives de l'estuaire comportent de nombreux accès au littoral, de multiples quais publics et des parcs permettant la randonnée pédestre en milieu littoral. Plusieurs sites sont axés sur l'interprétation du milieu marin et du patrimoine maritime. La baignade n'est pas une activité populaire dans l'estuaire maritime parce que l'eau demeure très froide tout au long de l'été. Il y a néanmoins une dizaine de plages publiques. La pêche sportive est pratiquée sur les quais et dans les rivières à saumon. La chasse aux oiseaux migrateurs est une activité moins importante que le long du couloir fluvial et dans le moyen estuaire. Les conditions de navigation sont difficiles, mais l'estuaire maritime compte de nombreux adeptes de la navigation de plaisance. Une vingtaine de compagnies offrent des croisières en mer axées sur l'observation des baleines dans la partie amont de l'estuaire maritime, quelques sociétés offrent la possibilité de visiter certaines des îles de la rive sud, certaines compagnies offrent des excursions de pêche en mer et une dizaine d'établissements offrent des excursions en kayak sur l'estuaire. L'estuaire maritime abrite des paysages sous-marins très appréciés par les plongeurs (Gagnon, 1996). À une moindre mesure que les autres activités humaines, l'essor de certaines activités comme l'observation des baleines, la pêche

récréative et la navigation de plaisance peut exercer des pressions sur certains environnements fragiles (MPO, 2005).

En somme, l'étude des caractéristiques naturelles et humaines du Saint-Laurent indique que ce système est dynamique et qu'il présente certains signes de détérioration. Ces conditions ont peut-être favorisées l'éclosion catastrophique de 2008 dans le Saint-Laurent, c'est pourquoi cette question fera l'objet du chapitre suivant.

3 DÉTERMINATION DES CAUSES

Afin d'envisager des interventions appropriées, il est primordial de déterminer la part relative des facteurs d'origine anthropique par rapport aux éléments d'ordre naturel et d'évaluer le potentiel d'augmentation de la fréquence et de la gravité des floraisons toxiques dans l'estuaire à l'avenir.

3.1 Hypothèses sur les causes de la marée rouge de 2008

À travers le monde, les floraisons d'algues nuisibles sont attribuées à deux facteurs principaux : les processus naturels, tels que les courants marins, les remontées d'eaux profondes et le débit des rivières; et des activités anthropiques favorisant l'augmentation de la charge des nutriments et l'accélération des changements climatiques (Sellner *et al.*, 2003). En ce qui a trait à la marée rouge exceptionnelle de 2008 dans l'estuaire du Saint-Laurent, les opinions qui circulent dans la société varient entre des thèses d'origine purement naturelle ou anthropique à une combinaison des deux. En effet, certaines opinions sont radicales, comme celle de Suzanne Roy, professeure en océanographie et spécialiste des algues nuisibles, qui a affirmé que la marée rouge de 2008 était bien liée à des facteurs naturels, et non pas à l'activité humaine ou à la pollution (Vallières, 2008). Michel Gilbert, directeur des sciences océaniques et de l'environnement à l'Institut Maurice-Lamontagne (IML), est du même avis : « Ce sont des phénomènes naturels quand les conditions sont favorables comme les coups d'eau » (Thériault, 2008b). D'autres opinions sont plus vagues et laissent place à interprétation. Par exemple, la publication d'une fiche d'information de Pêches et Océans Canada indique que les pluies abondantes de la fin du mois de juillet ont causé l'épisode catastrophique d'août 2008 (MPO, 2008a), sans toutefois spécifier ou nier leur influence sur l'apport de nutriments terrestres. Selon Véronique Nolet du Réseau d'observation de mammifères marins (ROMM), les chercheurs regroupés et concertés en 2008 auraient envisagé les impacts anthropiques, pour en venir à la conclusion que cette fleur d'eau n'était pas directement liée à des activités humaines, mais bien à des conditions météorologiques propices, soit beaucoup de précipitations et peu de vents (Nolet, 2010). À l'opposé, un article de Marc Saint-Pierre publié dans *Le Soleil* pointe du doigt certaines activités humaines, en indiquant que la floraison d'algues toxiques de 2008 était « probablement due aux incessantes pluies qui ont lessivé les terres de l'amont de leurs phosphates et nitrates, voire fait déborder les systèmes d'égout » (Saint-Pierre, 2008). Enfin, un article de

Greenpeace dénonce directement le ruissellement des engrais azotés utilisés pour l'agriculture, qui s'accumulent dans les estuaires et nourrissent les algues rouges (Greenpeace, 2008). Cette section tentera donc de mettre au clair les liens de cause à effet qui supportent les différentes thèses afin de formuler un jugement objectif et éclairé.

3.1.1 Thèse naturelle

Tel que décrit dans la section sur les conditions de croissance (1.1.2), de fortes pluies et du temps calme peuvent favoriser les proliférations d'*Alexandrium tamarense* (Roy, 2010). L'élément le plus remarquable était donc que les conditions météorologiques de l'été 2008 étaient propices à une marée rouge. Des pluies diluviennes se sont abattues sur une grande partie du territoire québécois à la fin du mois de juillet (Cliche, 2009; Measures et Lair, 2008; MPO, 2008a; Thériault, 2008a). En effet, les précipitations étaient 40 % plus abondantes que la moyenne au début du mois d'août (Vallières, 2008). De plus, les eaux de surface sont demeurées calmes durant les premières semaines d'août, en raison de vents plus faibles que d'habitude, permettant à la colonie d'algues de rester assez concentrée (Cliche, 2009; Measures et Lair, 2008; Vallières, 2008). Le régime naturel des courants a aussi influencé l'étendue de la marée rouge. Les colonies s'étant développées dans le secteur de Tadoussac, le courant de Gaspé a favorisé le transport de la masse d'eau contenant les algues vers la rive sud de l'estuaire et le long de la côte gaspésienne (Cliche, 2009; Vallières, 2008). La marée rouge a ainsi pu faire des dommages sur une plus grande distance qu'à l'accoutumée avant de se perdre dans le golfe du Saint-Laurent (Cliche, 2009). L'augmentation de la vitesse du vent, atteignant plus de 29 km/h à partir de la mi-août, a eu pour effet de dissiper la marée rouge (Cliche, 2009; Vallières, 2008).

La circulation de surface et le débit des rivières, indépendamment des contributions anthropiques, influencent grandement l'abondance et la distribution du plancton (Sellner *et al.*, 2003). Par exemple, la période et l'étendue de la toxicité des mollusques dans le golfe du Maine ont été liées au transport d'*A. tamarense* le long des rives dans un courant de surface créé par plusieurs rivières qui se jettent dans ce golfe (Weise *et al.*, 2002). Le transport des cellules algales par les courants rend possible que l'embouchure du Saguenay soit devenue un nouveau site d'éclosion, plus en aval que par le passé. De plus, les zones de remontées d'eau profondes créées par les vents, mieux connues sous le nom de résurgences, permettent l'introduction récurrente de nutriments pour le développement d'algues toxiques (Sellner *et al.*, 2003). Le site de l'embouchure du

Saguenay n'est pas une zone de résurgence, mais la bathymétrie locale révèle l'existence d'une muraille qui dirige les eaux profondes vers la surface, créant un enrichissement de cette couche d'eau (Levasseur, 1996). Cette caractéristique naturelle de l'estuaire a peut-être joué un rôle dans la croissance exceptionnelle de cette espèce d'algues en 2008.

Néanmoins, le facteur majeur qui a favorisé l'abondance des nutriments dans ce secteur est sans doute l'action des fortes précipitations (Nolet, 2010; Sellner *et al.*, 2003). Quand il pleut, cette eau percole dans les sols où elle peut solubiliser les substances humiques et les transporter dans les réseaux d'eau de surface. Ainsi, la teneur de substances humiques dans les eaux des rivières augmente et les rivières se déversent éventuellement dans les eaux estuariennes et côtières. Ce processus naturel est favorisé s'il pleut sur une grande surface du sol d'un bassin versant majoritairement forestier — comme celui de la rive Nord de l'estuaire —, car plus il y a de surface de contact pour la solubilisation, plus il y a d'exportation de substances humiques (Gagné, 2010; Weise *et al.*, 2002). Les substances humiques sont contenues naturellement dans la terre, et en plus grande quantité dans les sols riches en carbone organique comme les sols forestiers (Gagné, 2010; Thériault, 2008a). En ce qui a trait aux sols utilisés pour l'exploitation forestière, il semble qu'à court terme, la déforestation favorise ce genre d'exportation, car elle augmente la surface de contact de la pluie. Toutefois, une fois que le matériel soluble est exporté, il ne reste plus de substances humiques, qui ne sont plus renouvelées au même rythme que dans une forêt vivante, donc il n'y a plus d'exportation et peu d'effet à long terme. De plus, la proportion de terres utilisées par les humains est nettement inférieure à la proportion des terres à l'état naturel dans le bassin versant de l'estuaire (Gagné, 2010).

Les sites d'éclosion habituels sont à l'embouchure de la rivière Moisie à Sept-Îles et des rivières Manicouagan et Aux-Outardes à Baie-Comeau, qui forment parfois des panaches d'eau douce riches en substances humiques (Gagné, 2010; Weise *et al.*, 2002). Ces rivières favorisent le transport de ces substances, car elles sont naturellement plus sensibles aux pluies. En effet, elles possèdent un temps de résidence plus court, donc favorisent un transport plus rapide qui permet moins de consommation bactérienne. Le contenu en matière organique des rivières varie beaucoup suite à une pluie. Par exemple, l'étude de la matière organique contenue dans la rivière Rimouski après une pluie a montré une augmentation de facteur 10. Toutefois, à l'échelle du système du Saint-Laurent, il y a très peu de variation après une pluie (Gagné, 2010). Le volume d'eau est si important que les effets de l'apport en nutriments sont plus "dilués" (Nolet, 2010). De plus,

la matière organique réactive est grandement consommée en chemin. Ainsi, l'apport des rivières situées en amont de l'estuaire serait faible et aurait eu peu d'influence sur la marée rouge de 2008 (Gagné, 2010).

Bien que plusieurs espèces d'algues nuisibles soient favorisées par les activités humaines, il ne faut pas généraliser cette condition pour toutes les espèces algales. Les cycles de vie et les comportements de chaque espèce phytoplanctonique sont uniques (Sellner *et al.*, 2003). Des charges de nutriments similaires n'ont pas le même impact sur toutes les espèces, tous les environnements ou toutes les périodes de l'année. Malgré son importance, l'eutrophisation n'est pas la seule explication pour les floraisons toxiques (Anderson *et al.*, 2002). Puisque les floraisons d'*Alexandrium tamarense* ont surtout eu lieu dans des environnements relativement vierges, il est difficile de défendre l'idée que les apports de nutriments anthropiques auraient stimulé la floraison de 2008 (Solow, 2004). De plus, chaque expansion de ces organismes en Amérique du Nord a coïncidé avec des événements climatiques inhabituels, tels que des précipitations supérieures à la moyenne (Van Dolah, 2000). Des situations exceptionnelles de conditions météorologiques ont eu lieu par le passé sans l'intervention des êtres humains, il est donc difficile d'affirmer avec justesse et assurance qu'il y a un lien entre l'accélération des changements climatiques et la marée rouge de 2008 pour l'instant, car cet événement isolé ne constitue pas encore une tendance (Nolet, 2010). La communauté scientifique a la responsabilité d'indiquer l'importance des événements naturels dans la formation de ces floraisons (Sellner *et al.*, 2003).

À première vue, il est donc très difficile de lier directement la pollution d'origine terrestre et la floraison de 2008 en raison de l'effet notoire des processus physiques non anthropiques (Gagné, 2010; Nolet, 2010). La marée rouge de 2008, étonnante en raison de ses impacts exceptionnels, serait tout de même naturelle selon cette thèse.

3.1.2 Thèse anthropique

À l'échelle planétaire, les activités humaines peuvent contribuer aux floraisons d'algues nuisibles de plusieurs façons. De manière directe, des introductions d'espèces non indigènes ont eu lieu dans certaines régions du monde via les eaux de ballast ou la transplantation de mollusques. Cette voie de propagation n'est toutefois pas en cause pour ce qui est de la marée rouge de 2008, puisque *Alexandrium tamarense* est présente dans le Saint-Laurent depuis des centaines d'années. Toutefois, plusieurs impacts

indirects sont à considérer, notamment l'eutrophisation, le rejet de contaminants, le développement côtier et les changements climatiques globaux accélérés par les émissions de gaz à effet de serre (Van Dolah, 2000).

Le problème le plus répandu et chronique des zones côtières est causé par un excès de nutriments en raison de l'utilisation significativement plus élevée de fertilisants en agriculture (AEE, 2006; Anderson *et al.*, 2002; CBD, 2010 : Solow, 2004). Par exemple, les quantités d'engrais azotés utilisées pour l'agriculture au Canada ont été multipliées par 75 depuis les années 1950 (Greenpeace, 2008). Tant pour les pays industrialisés que ceux en développement, les eaux côtières ont globalement subi une augmentation de charge d'azote et de phosphore par un facteur de 8 et 3 respectivement, depuis le début des années 60 (Anderson *et al.*, 2002; Van Dolah, 2000). Outre l'intensification de l'agriculture, la croissance d'un large spectre d'activités humaines a substantiellement augmenté les rejets de nitrate, phosphore et autres nutriments dans l'environnement au cours du siècle dernier : la disposition des eaux usées urbaines et industrielles, le développement côtier, l'utilisation de combustibles fossiles, le transport maritime, l'élevage, l'aquaculture, l'exploitation forestière et certaines activités récréatives (AEE, 2006; Anderson, 2004; Anderson *et al.*, 2002; Solow, 2004). En fait, les êtres humains ajoutent plus d'azote réactif dans l'environnement que tous les phénomènes naturels conjugués, dont les plantes fixatrices d'azote, le feu et les éclairs (CBD, 2010).

Les voies de transport de ces nutriments vers les rivières, estuaires et zones côtières comprennent les réseaux d'égouts, les eaux souterraines, le ruissellement de surface et les dépositions atmosphériques (Anderson *et al.*, 2002; Solow, 2004). On peut diviser ces sources en deux grandes catégories, soit les sources ponctuelles et les sources diffuses. Les sources ponctuelles sont les quantités massives et croissantes d'effluents industriels, agricoles et d'eaux usées municipales. Bien que facilement identifiables, ces sources canalisées contribuent généralement moins aux rejets de nutriments dans l'environnement que les sources diffuses au cours d'une année. Selon une étude datant de 1996, les eaux usées du continent nord-américain ne contribueraient qu'à 12 % des flux d'azote et de phosphore vers l'océan Atlantique Nord. Les sources diffuses sont souvent plus préoccupantes, car elles sont étendues sur un large territoire et sont plus difficiles à contrôler. La quantité et la composition des nutriments transportés par le ruissellement varient selon les caractéristiques de la pluie et du sol, la topographie, le couvert végétal et d'autres facteurs environnementaux, et cela a des implications importantes pour le

développement des floraisons nuisibles. De plus, la croissance de la taille de la population et des pratiques agricoles a augmenté les charges de nutriments dans les eaux souterraines, qui peuvent affecter la croissance algale dans les eaux de surface réceptrices (Anderson *et al.*, 2002). Enfin, les dépositions atmosphériques provenant d'activités agricoles, urbaines et industrielles sont une source diffuse majeure de nutriments dans les eaux douces et côtières, car elles outrepassent les processus estuariens comme les zones humides qui filtrent les sources terrestres (Anderson *et al.*, 2002; Van Dolah, 2000). Dans les dépositions sèches ou humides, le phosphate absorbé sur des particules fines, le nitrate dérivé d'oxydes nitrique/nitreux particulaire ou oxydé et des métaux traces comme le fer représentent des sources importantes, spécialement pour les eaux faibles en nutriments. Dans les estuaires et zones côtières, il a été estimé que 20 à 40 % des intrants d'azote peuvent être de sources anthropiques d'origine atmosphérique (Anderson *et al.*, 2002).

La charge excessive de nutriments a été impliquée dans la production accélérée de phytoplancton, ou l'eutrophisation, qui se manifeste de façon plus visible par les floraisons d'algues en surface, et qui cause une diminution de l'oxygène dissous dans les eaux profondes (hypoxie) (AEE, 2006; CBD, 2010; Solow, 2004; Van Dolah, 2000). À la base, le concept d'eutrophisation désigne un processus naturel de vieillissement des écosystèmes aquatiques, par lequel les lacs larges, profonds et pauvres en nutriments deviennent éventuellement plus riches et plus productifs en organismes végétaux et animaux. Au cours de plusieurs milliers d'années, ces lacs se remplissent en sédiments organiques et inorganiques et se transforment progressivement en étangs puis en marécages. Toutefois, ce terme est plus récemment utilisé pour référer à l'enrichissement accéléré des lacs, rivières, estuaires et milieux marins en raison des activités humaines. Le phosphore et l'azote sont les deux principaux nutriments en cause dans l'eutrophisation. Dans les eaux douces, le phosphore est le nutriment le moins abondant parmi les nutriments nécessaires en grande quantité pour le phytoplancton, donc c'est celui qui limite naturellement leur croissance (Anderson *et al.*, 2002). Ainsi, ce sont les apports excessifs de phosphates qui favorisent davantage les floraisons d'algues bleu-vert (Anderson *et al.*, 2002; Greenpeace, 2008). À l'inverse, dans la plupart des zones côtières tempérées et polaires, c'est plutôt la disponibilité d'azote qui limite le plus la production primaire, et ce sont donc des apports de ce nutriment qui favorisent les algues rouges (Anderson *et al.*, 2002; Greenpeace, 2008; Van Dolah, 2000). Le phosphore et l'azote peuvent agir en synergie sur la

croissance algale dans les milieux estuariens ou marins où il y a des intrants élevés en azote. Par exemple, s'il y a une amélioration du traitement des eaux usées qui réduit le phosphore dans un segment de rivière, une réduction correspondante de la production primaire locale laissera plus d'azote disponible en aval dans le segment estuarien, où ce nutriment pourra supporter plus de croissance algale. En général, les dinoflagellés nuisibles d'estuaire ont tendance à avoir lieu dans des eaux qui ont des hausses saisonnières de nitrate et phosphate, ainsi que des quantités élevées de carbone organique dissous (COD) et d'autres formes de nutriments organiques (Anderson *et al.*, 2002). Ainsi donc, les charges de nutriments d'origine anthropique stimulent la croissance du phytoplancton et contribuent à l'augmentation de plusieurs floraisons d'algues toxiques (Anderson, 2004; Anderson *et al.*, 2002; CBD, 2010; Sellner *et al.*, 2003; Solow, 2004; Van Dolah, 2000). Le phytoplancton nuisible peut augmenter en abondance en raison d'un enrichissement, mais rester en même fraction relative par rapport à la biomasse de phytoplancton totale. Toutefois, même une augmentation modeste dans l'abondance d'espèces nuisibles peut devenir notable en raison des effets toxiques ou nuisibles. En général, seule une ou quelques espèces dominent le phytoplancton lors d'une perturbation des niveaux de nutriments (Anderson *et al.*, 2002).

Il ne faut pas considérer uniquement l'augmentation de la concentration totale en éléments nutritifs dans l'environnement côtier, mais aussi la modification des ratios de ceux-ci (Anderson *et al.*, 2002; CBD, 2010; Van Dolah, 2000). En effet, des changements dans la composition des espèces algales ont souvent été attribués à des changements dans les ratios de nutriments disponibles, particulièrement l'azote par rapport à la silice (N:Si), le phosphore par rapport à la silice (P:Si) et l'azote par rapport au phosphore (N:P). Par exemple, il a été démontré que la diminution des ratios de silice par rapport à l'azote et au phosphore a favorisé la croissance de flagellés aux dépens de celle de diatomées (Van Dolah, 2000). En effet, la croissance des diatomées s'arrête quand les sources de silice, dont elles dépendent pour former leur enveloppe cellulaire – une coque de pectine imprégnée de silice — sont déclinées (Anderson *et al.*, 2002; Levasseur, 1996). Puisque la silice n'est pas abondante dans les effluents d'eaux usées, mais que l'azote et le phosphore le sont, les ratios N:Si et P:Si de certaines eaux côtières ont augmenté au cours des dernières décennies. D'autre part, le nombre de marées rouges de dinoflagellés à Tolo Harbour, en Chine, a augmenté durant les années 1982 à 1989 alors que le ratio moyen annuel N:P est passé de 20:1 à 11:1, indiquant qu'une plus forte proportion de

phosphore avantage certains dinoflagellés en eaux salées. Ce concept s'est aussi étendu aux formes organiques de nutriments, car l'augmentation du ratio de carbone organique dissous (COD) par rapport à l'azote organique dissous (AOD) a été observée au cours de plusieurs floraisons. En fait, les dinoflagellés auraient des préférences physiologiques pour les formes réduites d'azote, étant souvent associés à de faibles concentrations de nitrate et à de plus fortes concentrations d'ammonium, d'urée ou d'AOD. D'autres nutriments comme le fer peuvent aussi influencer significativement la dominance des espèces de la communauté phytoplanctonique dans des milieux en eutrophisation (Anderson *et al.*, 2002).

Plusieurs floraisons nuisibles ont été causées par la charge de nutriments de sources anthropiques terrestres, notamment dans la baie Chesapeake et l'estuaire Albemarle-Pamlico aux États-Unis, la mer intérieure de Seto au Japon, la mer Noire en Europe et les eaux côtières chinoises (AEE, 2006; Anderson *et al.*, 2002). Ces floraisons ont parfois mené à l'anoxie et ont eu des impacts nuisibles sur les pêcheries, les écosystèmes, la santé humaine et les activités récréatives. Plusieurs de ces régions ont aussi observé des réductions dans la biomasse du phytoplancton ou le nombre de floraisons nuisibles lorsque des mesures de contrôle ont été mises en place (Anderson *et al.*, 2002; CBD, 2010; Sellner *et al.*, 2003). Par exemple, la mer Noire a été affectée par une pollution importante durant les années 1970 et 1980 en raison de l'industrialisation, l'utilisation de fertilisants et l'urbanisation dans les huit pays de son bassin versant. Une augmentation significative des nutriments organiques et inorganiques a été notée durant les 20 premières années : les nitrates et le phosphate étaient respectivement 8 et 20 fois plus élevés qu'auparavant. Par conséquent, cet enrichissement a provoqué une augmentation de la fréquence et de la magnitude des floraisons algales, des zones anoxiques et des mortalités de poissons. Les diatomées et des algues de plus larges dimensions ont été remplacées par le nanoplancton et les dinoflagellés. En 1991, la crise économique causée par l'éclatement de l'ex-Union soviétique eut pour conséquence de diminuer radicalement l'usage de fertilisants. Les diatomées sont redevenues dominantes, et le nanoplancton et les dinoflagellés ont diminué. Le nombre et la taille des floraisons ont commencé à diminuer dès lors et cette tendance s'est maintenue jusqu'à aujourd'hui. Toutefois, il est à présager que les floraisons redeviendront abondantes avec la reprise du développement économique et l'usage abusif de fertilisants (Anderson *et al.*, 2002). Dans les eaux marines de Tolo Harbor à Hong Kong, en Chine, il y a eu 8 fois plus de marées rouges de

dinoflagellés par année entre 1976 et 1986. Parallèlement, la densité de la population humaine a été multipliée par 6, et conséquemment, les rejets de nutriments dans le bassin versant ont été 2,5 fois plus élevés (Anderson *et al.*, 2002; Sellner *et al.*, 2003; Van Dolah, 2000). La concentration en azote et en phosphore a été, respectivement, 25 et 6 fois plus élevée durant cette période (Sellner *et al.*, 2003). Au milieu des années 1980, les rejets de pollution ont diminué en raison d'une diversion des effluents d'eaux usées vers Victoria Harbour. Il y a ainsi eu une résurgence des diatomées et une diminution des dinoflagellés et des marées rouges à Tolo Harbor (Anderson *et al.*, 2002). Un phénomène semblable s'est déroulé dans la mer intérieure de Seto au Japon, entre 1965 et 1976. Une augmentation rapide de la population et du développement industriel dans la région a causé une multiplication des floraisons d'algues toxiques par 7, jusqu'à l'atteinte de 300 jours de floraisons par année. Les rejets domestiques et industriels ont augmenté la concentration d'azote de 30 fois et celle de phosphore de 5 fois au cours de cette période. En 1973, les autorités japonaises ont légiféré pour réduire la demande chimique en oxygène (DCO). La mise en œuvre de meilleures pratiques a ainsi réduit la DBO, les concentrations d'azote ont diminué pour atteindre 13 fois le niveau initial et les concentrations de phosphore sont revenues au niveau précédent le développement. Le nombre de marées rouges a commencé à diminuer en 1977, jusqu'à moins de 30 % de la fréquence maximale. Ce taux a été maintenu jusqu'à aujourd'hui (Anderson *et al.*, 2002; Sellner *et al.*, 2003).

Outre les charges de nutriments, les activités humaines favoriseraient également les floraisons d'algues nuisibles par leur influence sur les changements climatiques planétaires. La température moyenne globale a augmenté de 0,8 °C entre 1889 et 1990 parallèlement à l'industrialisation et à la production accrue de gaz à effet de serre. Les océans, en raison de leur capacité de réservoir de chaleur, influencent et répondent aux changements climatiques par la circulation thermohaline, qui recircule les nutriments, l'oxygène et le dioxyde de carbone (Van Dolah, 2000). Dans l'écosystème marin du Saint-Laurent, le pourcentage d'eau du courant du Labrador à teneur plus élevée en oxygène, par rapport à l'eau du Gulf Stream à teneur moins élevée, a chuté de 72 % dans les années 1930 à 3 % entre 1984 et 2008. Sous l'effet du réchauffement planétaire, la tendance à une stratification accrue et à un mélange vertical réduit risque de se maintenir (MPO, 2010). D'autre part, en raison des changements climatiques, les épisodes de fortes précipitations seront de plus en plus nombreux et intenses. Plus l'eau tombe rapidement,

moins elle a de possibilités de percoler, plus elle ruisselle avec force et plus elle transporte de nutriments vers les cours d'eau. En outre, la pluie est légèrement plus chaude (Lapalme *et al.*, 2008). Ces conditions favorisent l'hypoxie en profondeur et les floraisons algales en surface.

Malgré la prise en compte de toutes ces informations et l'analyse d'exemples probants, il est difficile d'évaluer précisément en quoi les activités humaines influencent l'apparition et la sévérité des floraisons d'algues nuisibles en raison de la complexité des questions sous-jacentes (Solow, 2004; Van Dolah, 2000). Par exemple, pour certaines espèces d'algues nuisibles, l'enrichissement de nutriments n'est pas un facteur de contribution apparent (Anderson *et al.*, 2002). C'est là que le bât blesse, car il n'y a pas de preuve soutenue qui suggère que l'eutrophisation des eaux côtières favorise les floraisons d'*Alexandrium tamarens* qui ont lieu dans des eaux oligotrophes (Van Dolah, 2000). Cette espèce a depuis longtemps fait des floraisons en Alaska, au nord-est du Canada, dans le golfe du Maine et au nord du Japon, dans des zones relativement non polluées et historiquement vierges (Anderson *et al.*, 2002). Ces floraisons utilisent indéniablement des nutriments qui dérivent des activités humaines, en raison de leur proximité à la côte, mais leur récente expansion sur les côtes Est et Ouest de l'Amérique du Nord semble plutôt refléter le transport des kystes dans ces régions par des tempêtes naturelles et des courants, et être influencée par des événements climatiques inhabituels (Anderson *et al.*, 2002; Van Dolah, 2000). L'augmentation de nutriments serait donc un facteur secondaire pour la croissance d'*Alexandrium tamarens*. Facteur secondaire... ou aggravant? En fait, les nutriments peuvent jouer un rôle majeur dans la régulation de la toxicité de certaines espèces nuisibles, car la toxicité peut augmenter ou diminuer dramatiquement dépendamment du nutriment limitant. La production de saxitoxine par *A. tamarens* peut être de 5 à 10 fois plus élevée dans les cellules limitées en phosphore que dans celles limitées en azote. En raison d'un enrichissement en nutriments, les cellules d'algues nuisibles peuvent être plus abondantes, mais parce que les ratios de nutriments sont altérés, leur toxicité cellulaire peut être différente que dans des conditions non eutrophisées (Anderson *et al.*, 2002).

Compte tenu de ces éléments, on peut soupçonner que l'événement catastrophique de 2008 dans l'estuaire du Saint-Laurent est un signal révélateur que la capacité limite du milieu a été dépassée, et que l'excès de nutriments accentue les conséquences des floraisons de cette algue. Il est possible que le lien entre les floraisons d'*A. tamarens* et

une augmentation des nutriments n'ait pas encore été proprement identifiée. Par exemple, il peut y avoir un délai temporel significatif entre les activités humaines qui enrichissent les eaux et un impact éventuel sur les floraisons nuisibles, tel qu'expérimenté au Long Island Sound, où on estime que la marée brune massive qui a commencé soudainement en 1985 reflète l'utilisation lourde de fertilisants sur les sols 10 à 20 ans plus tôt (Anderson *et al.*, 2002). Il serait donc intéressant de poursuivre les recherches en ce sens dans le système Saint-Laurent. L'estuaire du Saint-Laurent et le golfe du Maine sont qualifiés « relativement vierges » dans la littérature scientifique. Pourtant, on ne peut ignorer que ces zones reçoivent des quantités très importantes et croissantes de nutriments et de polluants chimiques. D'ailleurs, dans les zones côtières de l'Atlantique, il y a une augmentation du nombre de fermetures de zones conchylicoles en raison de pollution bactériologique d'origine terrestre, et il y a de plus en plus d'événements d'IMP (Dufour *et al.*, 2009). Comme les produits chimiques, il est possible que les engrais azotés transportés dans l'estuaire du Saint-Laurent par le ruissellement proviennent de n'importe où dans le bassin versant du Saint-Laurent et des Grands Lacs, d'aussi loin que les régions très urbanisées et agricoles de l'Ontario et du Midwest américain (Greenpeace, 2008). En effet, le nitrate peut voyager de grandes distances (Lapalme *et al.*, 2008). Par exemple, il a été démontré que du nitrate de source terrestre a été transporté 400 km en aval jusqu'à l'estuaire Neuse en Caroline du Nord en 2 semaines et que cela a causé une augmentation de la productivité du phytoplancton (Anderson *et al.*, 2002). Il faut aussi considérer qu'une grande part de la population québécoise réside à proximité des rives du fleuve Saint-Laurent et de ses principaux affluents, et que ces zones sont également privilégiées pour les activités agricoles et industrielles. De plus, de larges zones humiques ont disparu en raison du développement riverain, réduisant du même coup le pouvoir filtrant des rives naturelles. Il faut aussi considérer la pollution atmosphérique. L'azote atmosphérique précipité dans les cours d'eau par les pluies et la neige stimule la croissance des plantes et des algues. Les oxydes d'azote sont produits par les moteurs deux-temps, les véhicules tout terrain, les motoneiges et les tondeuses à essence, mais surtout par des activités industrielles telles que le raffinage des sables bitumineux (Lapalme *et al.*, 2008). D'ailleurs, l'année 2008 a été remarquable pour l'immense quantité de lacs affectés par les algues bleu-vert. On estime que les émissions d'azote du raffinage des sables bitumineux d'Alberta, transportées et déposées au Québec par les fortes

pluies, ont favorisé l'enrichissement atmosphérique de ces lacs, et sans doute cela a-t-il également fertilisé l'estuaire avec les résultats qu'on connaît (Francoeur, 2008).

Au-delà des intrants excessifs de nutriments, la marée rouge de 2008 pourrait être révélatrice de perturbations globales au sein de l'écosystème du Saint-Laurent. Effectivement, l'expansion des floraisons d'algues toxiques et nuisibles est perçue par certains comme un bioindicateur des perturbations écologiques marines à grande échelle (Van Dolah, 2000). Le fait que la présence d'une espèce algale nuisible mènera à des impacts toxiques dépend de plusieurs facteurs comme les caractéristiques de mélange des masses d'eau, les conditions hydrographiques, les conditions météorologiques, la présence, la disponibilité de lumière, l'abondance relative des éléments nutritifs et l'abondance d'organismes brouteurs. Par exemple, les rejets de nutriments sont très souvent accompagnés de produits néfastes pour l'environnement : des contaminants acides, des pesticides, sédiments en suspension, métaux lourds, des substances toxiques, substances hormonales et pathogènes microbiens voyagent avec les nutriments dans les dépositions atmosphériques, le ruissellement des sols ou les effluents municipaux et industriels. Ces substances causent des stress et des maladies chez les organismes brouteurs, qui peuvent indirectement aider à promouvoir la croissance d'espèces algales nuisibles via une plus faible pression de broutage (Anderson *et al.*, 2002).

Il y a peu de doute que, en augmentant le niveau de nutriments dans l'océan et en accélérant les changements climatiques, les activités humaines ont augmenté la fréquence, l'étendue et la sévérité des zones mortes dans les zones côtières du monde entier (Solow, 2004). En ce qui concerne *A. tamarense*, le temps est venu d'évaluer en profondeur les changements induits par les humains dans la distribution et la dynamique de ces floraisons, particulièrement en ce qui concerne les mécanismes physiologiques, écologiques et environnementaux impliqués (Anderson *et al.*, 2002). Pour ce qui est de la marée rouge de 2008 dans l'estuaire, d'une intensité et d'une puissance meurtrière sans précédent, nier que les activités humaines ont un quelconque impact serait sans doute une erreur. Un lien existe assurément, et il est souhaitable que des études scientifiques à venir parviennent à le mettre en évidence.

3.1.3 Prise de décision

La prise en compte de ces informations permet premièrement de constater le double rôle des processus naturels et anthropiques dans la formation de floraisons d'algues nuisibles. L'étude de différents cas nous apprend que certaines floraisons, favorisées par la circulation, la météorologie ou la charge de nutriments issus des remontées d'eaux profondes ou de la décharge des rivières dans des régions peu habitées, ont lieu sans l'intervention de l'être humain. Il est aussi évident que certaines espèces sont fortement influencées par les activités humaines qui ont un impact sur le sol, l'eau et l'air. Les impacts de ces dernières sont potentiellement gérables, si on accorde de la volonté politique avec les ressources nécessaires pour limiter les rejets associés aux bassins versants et au développement côtier.

Dans le cas précis d'*Alexandrium tamarense* dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, les indices rassemblés ici ne permettent pas de conclure à un effet anthropique direct. Les processus physiques ont joué un rôle primordial dans la marée rouge de 2008. Néanmoins, cette étude démontre qu'il est fort possible que des facteurs anthropiques, favorisant des conditions climatiques extrêmes, une augmentation des intrants de nutriments et une perturbation générale de l'équilibre de l'écosystème, ont joué le rôle de catalyseurs et qu'ils ont favorisé l'ampleur catastrophique de cette floraison. Ainsi, la marée rouge de 2008 peut être interprétée comme un signal, qui indique qu'il faut faire plus d'efforts pour protéger cet environnement et les ressources que nous en tirons.

Il serait donc avisé, même en l'absence de lien direct, de considérer sérieusement l'impact anthropique sur la marée rouge de l'estuaire et d'enclencher rapidement un plan d'intervention. Dans le cas où la modification des activités humaines ne réduirait pas les floraisons d'algues rouges, les efforts ne seraient tout de même pas vains, car de nombreux problèmes environnementaux sont liés aux mêmes facteurs de stress. Notons par exemple l'eutrophisation, l'hypoxie, les pertes d'habitat et la diminution de la biodiversité. Plusieurs gestionnaires favoriseront la gestion des produits toxiques bien avant la gestion des nutriments. Toutefois, les efforts actuels visent surtout les sources ponctuelles, alors que les produits chimiques voyagent avec les nutriments dans les sources diffuses. Ainsi, ces deux types de contaminants peuvent se gérer par les mêmes moyens. La lutte aux floraisons toxiques n'est qu'une raison de plus pour agir sur les bassins versants.

Enfin, il ne faut pas négliger le principe de précaution, adopté en 2006 dans la *Loi sur le développement durable* du Québec et en 2008 dans la *Loi fédérale sur le développement durable*, selon lequel, « lorsqu'il y a un risque de dommage grave ou irréversible, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement ». De plus, nos connaissances actuelles des impacts de plusieurs activités humaines nous permettent déjà d'appliquer le principe de prévention, inclus dans la Loi québécoise, qui indique « qu'en présence d'un risque connu, des actions de prévention, d'atténuation et de correction doivent être mises en place, en priorité à la source ».

3.2 Hypothèses sur les projections futures

Avant d'entreprendre un plan d'intervention approprié pour lutter contre les floraisons d'algues toxiques dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, il faut estimer les possibilités qu'un évènement de l'ampleur de celui de 2008 se reproduise.

3.2.1 Thèse rare

À l'échelle mondiale, l'observation d'une augmentation des floraisons d'algues nuisibles est en partie due à une augmentation des efforts de surveillance de ces évènements et au développement rapide de nouvelles technologies de détection (Sellner *et al.*, 2003; Van Dolah, 2000). En effet, la conscientisation de plus en plus accrue à ce problème a favorisé l'établissement de nouveaux programmes de recherche et de systèmes de surveillance qui ont permis d'identifier des floraisons qui n'étaient pas reconnues dans le passé (Van Dolah, 2000).

Pour ce qui est de la marée rouge de 2008 au Québec, plusieurs experts locaux s'accordent pour dire que les possibilités d'une récurrence sont faibles. Selon Stéphane Lair, professeur à la Faculté de médecine vétérinaire de l'Université de Montréal à Saint-Hyacinthe, cette floraison « a été causée par une improbable combinaison de facteurs qui ne devrait pas se répéter de si tôt » et il considère « qu'il y a lieu d'espérer que des épisodes de ce genre et de cette envergure demeurent très rares » (Cliche, 2009). Selon Véronique Nolet du ROMM, « la prolifération de *Alexandrium* à une telle échelle est extrêmement rare, il faut des conditions très particulières pour qu'une floraison de cette ampleur se reproduise à nouveau » (Nolet, 2010). Enfin, M. Jean-Pierre Gagné,

professeur en géochimie organique marine à l'ISMER, indique « qu'il n'y a pas de raison que ça ne se reproduise pas, mais qu'il n'y a pas d'indice que ça se reproduira non plus » (Gagné, 2010).

3.2.2 Thèse récurrente

En se référant à nouveau à l'échelle mondiale, l'expansion de certains cas de floraisons d'algues toxiques dans de nouvelles régions géographiques est bien documentée (Van Dolah, 2000). Pratiquement tous les pays côtiers sont maintenant menacés par de multiples espèces d'algues nuisibles ou toxiques, souvent à de nombreux lieux et sur de larges espaces (Anderson *et al.*, 2002). Au Canada, les proliférations d'algues nuisibles marines semblent en augmentation dans l'océan au large des côtes (GC, 2008).

En ce qui a trait à la marée rouge de 2008 au Québec, certaines personnes-ressources entrevoient la possibilité d'un retour indésirable. D'un ton assuré, M. Darier de Greenpeace affirme que la marée rouge de 2008 est susceptible de se reproduire si on ne résout pas les problèmes à la source (Darier, 2010). Mme Nolet du ROMM, défendant de prime abord la thèse rare, souligne que, « bien qu'extrêmement rare, la prolifération d'*Alexandrium* à une telle échelle est inquiétante et pourrait causer des torts à la santé humaine si aucune mesure préventive n'était mise en place » (Nolet, 2010). D'autre part, bien qu'en défaveur de la thèse selon laquelle les intrants de nutriments anthropiques favorisent les floraisons d'*Alexandrium*, M. Gagné note que « si l'homme modifie le climat, les situations deviennent de plus en plus extrêmes et les fortes pluies sont suivies de sécheresses plus importantes ». Il note également que « si ces pulses deviennent plus importants, plus fréquents, il y aura plus de transport de substances humiques, et la probabilité que les floraisons d'algues toxiques se présentent pourrait être augmentée » (Gagné, 2010).

3.2.3 Prise de décision

La possibilité que l'expansion des marées rouges dans le monde ne soit qu'un résultat d'une surveillance plus accrue ne devrait pas minimiser nos inquiétudes ni altérer la manière que l'on va mobiliser les ressources pour les contrer. À mon avis personnel, on peut soupçonner que la marée rouge de 2008, ayant recouvert un territoire beaucoup plus vaste que par le passé, a possiblement permis la déposition de kystes dans plusieurs secteurs de l'estuaire. Cela permettra peut-être l'éclosion de floraisons plus graves dans

les années à venir si les conditions idéales se présentent à nouveau. Enfin, la nouveauté et l'ampleur du phénomène dans l'estuaire du Saint-Laurent devraient suffire à nous motiver d'agir de toute urgence.

4 PLAN D'INTERVENTION

Basée sur une revue de littérature approfondie, la présente étude a démontré que les facteurs anthropiques favorisant des conditions climatiques extrêmes, une augmentation des intrants de nutriments et une perturbation générale de l'équilibre de l'écosystème ont fort possiblement favorisé l'ampleur catastrophique de la floraison de 2008. Ces mêmes facteurs accentuent également les risques que les conditions favorables à ces floraisons toxiques se présentent à nouveau. Il s'avère donc crucial d'augmenter les efforts pour protéger l'environnement de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, ainsi que les ressources que nous en tirons. Pour assurer le succès de la lutte contre les marées rouges, il est important de travailler sur plusieurs fronts. C'est pourquoi le plan d'intervention suivant recommande de maximiser les efforts de prévention par la réduction des intrants à la source, par la surveillance, la prévision et l'atténuation des impacts des floraisons, ainsi que par la mobilisation du public.

4.1 Réduction des intrants à la source

La complexité des conditions qui favorisent les floraisons d'*Alexandrium* constitue un réel défi pour la gestion de cette problématique. Cependant, l'utilisation plus durable de l'environnement offre par la même occasion de nombreuses opportunités de faire des petits changements peu coûteux, mais ayant un large impact cumulatif (Solow, 2004). La lutte aux nutriments, aux changements climatiques et aux perturbations de l'habitat peut se faire via la gestion intégrée du territoire terrestre et marin. Il faut que tous les acteurs concernés par la gestion ou l'utilisation du Saint-Laurent et de ses ressources s'engagent à protéger l'écosystème et à agir pour assurer son développement durable (GC et GQ, 2006). Quelques pistes de solutions sont donc proposées pour les principaux niveaux décisionnels de la société.

4.1.1 Secteurs commerciaux, industriels, agricoles et ressources naturelles

Le chapitre 2 présente une liste des principaux impacts des activités humaines majeures qui sont effectuées dans le bassin Grands Lacs et Saint-Laurent, notamment dans les secteurs de la navigation, des pêcheries, de l'aquaculture, de l'agriculture, de la foresterie, des mines, des combustibles fossiles, de l'hydroélectricité, des industries et des activités récréatives. Il existe de nombreux guides environnementaux qui proposent des mesures d'atténuation des impacts de ces activités. Cependant, ces lignes directrices ne sont pas

appliquées systématiquement, en raison d'un manque d'information ou de support technique des intervenants, de contraintes économiques et de volonté politique insuffisante pour exiger leur respect. La présente section identifie quelques initiatives en cours, et certains concepts qui méritent davantage d'attention et de mise en œuvre dans les secteurs visés.

Une stratégie favorisant la navigation durable sur le Saint-Laurent a été mise sur pied par le Comité de concertation Navigation, regroupant les groupes et les gouvernements concernés. Les objectifs de cette stratégie visent la gestion intégrée du dragage et des sédiments, la protection des berges contre l'érosion causée par la navigation, le contrôle de l'introduction d'espèces exotiques par les rejets des eaux de ballast des navires et l'amélioration de la gestion des risques et des dangers environnementaux (Faivre et Bouchard, 2001). Des documents de soutien ont été publiés pour favoriser la mise en œuvre de cette stratégie (PSL, 2004). Le ministère des Pêches et Océans Canada encadre les activités de pêches de façon à assurer la pérennité de cette ressource très lucrative. Par exemple, l'initiative de Gestion intégrée du golfe du Saint-Laurent (GIGSL) vise à concrétiser la santé des océans, les sciences et la technologie et le développement durable des ressources dans un cadre de gestion écosystémique (MPO, 2005). Ce ministère propose également des bonnes pratiques de gestion visant à réduire la pollution organique issue des usines de transformation des produits marins, via la publication d'un guide technique et l'implantation des réglementations environnementales (MPO, 2003). De plus, le concept d'aquaculture multitrophique intégrée (AMTI) prend de plus en plus d'ampleur dans ce secteur (Solow, 2004). Il s'agit de combiner dans une même exploitation aquacole l'élevage de poissons et la culture d'organismes filtreurs ayant une valeur commerciale, tels que les mollusques et les algues. Les algues captent une partie de l'azote dissous dans l'eau et les moules prospèrent dans ce milieu enrichi de particules d'aliment et de déchets, ce qui permet de recycler les matières nutritives des aliments pour poisson qui sont autrement perdues dans la mer (MPO, 2009).

Plusieurs programmes et règlements fixent les normes relativement aux pratiques agricoles. Au moment de la révision de ces normes, il serait opportun de tenir compte de l'évolution climatique et des caractéristiques des bassins versants régionaux afin de favoriser une adaptation appropriée par les producteurs (Chevalier, 1996; GC, 2008). De plus, différentes pratiques agricoles, telles que l'établissement de bandes riveraines, la rotation des cultures, le semis direct, le contrôle de l'érosion et des déplacements de l'eau

de surface, ainsi que le choix judicieux des périodes et des méthodes d'application des engrais, ont été élaborés afin de protéger la qualité de l'environnement contre les effets de l'érosion et le lessivage des éléments nutritifs (GC, 2008). Par ailleurs, l'adoption de ces meilleures pratiques est aussi un investissement pour les fermiers, qui mettraient plus de fertilisant dans leur sol et moins dans l'océan (Solow, 2004). Cependant, les réglementations en place ne sont pas suffisamment strictes et plusieurs de ces mesures demeurent volontaires à ce jour. Il est de plus en plus urgent d'épurer l'eau avant qu'elle ne quitte les parcelles cultivées (Chevalier, 1996; Lapalme *et al.*, 2008). Au Canada, environ 28 % des exploitations agricoles ont des plans environnementaux pour réduire l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement (GC, 2008). Un exemple de cas international peut inspirer les futurs efforts de lutte contre la pollution par les nutriments du Canada. La directive de l'Union européenne sur les nitrates s'attaque aux sources diffuses de pollution et propose des mesures d'utilisation plus efficace des engrais qui ont déjà réduit les taux de nitrates et de phosphates des masses d'eaux continentales, bien que de manière très lente. L'amélioration de la qualité de l'eau a déjà contribué à une remise en état écologique de certaines rivières (CBD, 2010). En fait, les activités agricoles intensives sont très coûteuses pour la société, qui doit entre autres traiter davantage l'eau potable et subir des pertes importantes de la qualité de ces ressources naturelles (Harvey, 2000). L'adoption de pratiques plus durables peut également réduire la vulnérabilité des récoltes et la dépendance des agriculteurs aux subventions en diversifiant la production et en assurant la pérennité de l'environnement (MacRae *et al.*, 2002). En outre, il existe plusieurs subventions, telles que le programme Prime vert, pour faciliter la transition des pratiques agricoles. De plus, le gouvernement du Québec a déjà mis en œuvre un plan d'action dans lequel il préconise l'écoconditionnalité, c'est-à-dire un incitatif financier qui assure que l'aide financière versée aux producteurs soit conditionnelle à certaines exigences environnementales (MAPAQ, 2008). Il est aussi possible d'appliquer des mesures d'atténuation dans les fermettes, les centres équestres, les pépinières, les centres horticoles, les terrains de golf, et les éleveurs de truite en lac privé, car ceux-ci n'exercent la plupart du temps aucun contrôle sur leurs rejets (Chevalier, 1996; Lapalme *et al.*, 2008).

En foresterie, il existe de nombreux moyens pour éviter la contamination des cours d'eau par les sédiments. Par exemple, il faut privilégier les coupes de jardinage, soit prélever un faible pourcentage des tiges, ne pas faire de coupe totale sur les pentes fortes, utiliser de

la machinerie adaptée au milieu, conserver une bande tampon boisée le long des petits cours d'eau et mettre en place des programmes de régénération et de reboisement. La gestion de certains lots forestiers devrait être assumée sur d'autres bases que les revenus de récolte, et devrait impérativement prendre en compte la protection des cours d'eau, la gestion du tourisme et la sauvegarde du paysage. Par exemple, toute coupe devrait être interdite dans les bassins versants où le sol est friable (Gagné, 2010; Lapalme *et al.*, 2008). Depuis l'année 2000, la certification de gestion durable a été obtenue pour 87 % de la superficie forestière publique exploitée au Canada (GC, 2008). Néanmoins, des progrès importants demeurent à faire dans les exploitations privées. Pour ce qui est de l'exploration et de l'exploitation pétrolière et gazière dans le golfe du Saint-Laurent et les régions côtières environnantes, elles devront à tout prix adopter une approche intégrée pour maximiser le potentiel des ressources de l'industrie, tout en réduisant au minimum les effets néfastes sur l'écosystème et les conflits avec les autres utilisateurs du milieu (MPO, 2005). Le futur projet d'exploitation pétrolière et gazière Old Harry dans le détroit de Cabot est particulièrement à surveiller actuellement (Radio-Canada.ca, 2010). En ce qui a trait à l'hydroélectricité, il est important que cette forme d'énergie ne soit pas aveuglément considérée comme totalement verte et durable. Il faut absolument favoriser la réduction des utilisations et l'efficacité énergétique avant de songer à harnacher d'autres affluents du système Saint-Laurent. Plusieurs progrès sont encore à faire en ce sens, mais cette idée fait son chemin dans l'industrie énergétique.

En ce qui concerne le secteur industriel, les services gouvernementaux et les organismes internationaux ont préparé des guides d'élaboration et d'implantation de mesures de prévention de la pollution de l'eau, de façon à réduire les intrants à la source, d'améliorer les procédés pour favoriser le recyclage et la valorisation, puis de mieux traiter les rejets dans l'environnement. Les gouvernements peuvent également utiliser des règlements et des incitatifs financiers pour encourager davantage les entreprises à adopter des mesures préventives. Par exemple, le gouvernement Français subventionne les entreprises qui implantent des mesures de prévention de la pollution à partir de fonds amassés par la taxation des entreprises les plus polluantes. Les associations à but non lucratif, la presse et les clients peuvent également faire des pressions pour que les entreprises se développent de façon plus durable. Pour ce qui est de la pollution atmosphérique, la seule façon d'éliminer l'émanation de contaminants dans l'atmosphère consiste souvent à prévenir à la source la formation ou l'entraînement des contaminants, via des actions

allant de la mise en place de codes de bonnes pratiques au changement radical des procédés de fabrication (Chevalier, 1996).

4.1.2 Gouvernements

À l'échelle gouvernementale, plusieurs efforts conjoints sont présentement en cours. Par exemple, les gouvernements du Québec, de l'Ontario et des huit États américains des Grands Lacs, ont signé en décembre 2005 l'Entente sur les ressources en eaux durables du bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent qui vise à maîtriser les prélèvements d'eau sur l'ensemble du bassin et interdit notamment les dérivations hors du bassin. L'entente fait explicitement référence au changement climatique et au principe de précaution. De plus, une nouvelle politique de l'eau a été adoptée au Québec en 2002. Cet outil peut contribuer à diminuer les vulnérabilités de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques dues aux changements climatiques. La gestion par bassin versant, actuellement en voie de réalisation, permettra également d'assurer une approche écosystémique de la gestion de l'eau (GC, 2008). Citons également le Programme d'action national du Canada pour la protection du milieu marin contre la pollution due aux activités terrestres (PAN) (PAN, 2000), la mise en place du Parc marin du Saguenay-Saint-Laurent (PMSSL) et la création de Zones d'intervention prioritaires de phosphore (ZIPP) du MAPAQ. Présentement, des démarches sont entreprises pour limiter surtout les rejets de phosphore dans les milieux lacustres, mais on sait maintenant qu'il devrait y avoir le même empressement pour les nitrates qui aboutissent tôt ou tard dans les zones côtières (Greenpeace, 2008; Lapalme *et al.*, 2008). Ces deux nutriments devraient donc être gérés collectivement dans le développement de stratégies pour minimiser les floraisons d'algues nuisibles (Anderson *et al.*, 2002). La volonté d'action des gouvernements est cruciale pour réaliser rapidement la réduction à la source des intrants de nutriments, des émissions de gaz à effet de serre et de toute activité qui altère la qualité de l'écosystème (Greenpeace, 2008). En fait, la gouvernance, la réglementation et la gestion des activités exercées dans le golfe du Saint-Laurent sont la responsabilité de tout un éventail de ministères et d'organismes gouvernementaux du Canada et des provinces du Québec, du Nouveau-Brunswick, de la Nouvelle-Écosse, de l'Île-du-Prince-Édouard et de Terre-Neuve-et-Labrador, ainsi que d'un grand nombre d'organismes de développement économique, des Premières nations, des groupes industriels et des organismes non gouvernementaux qui s'intéressent à la gestion des ressources du golfe,

de ses côtes et de ses estuaires. Il sera donc important d'identifier le plus grand nombre d'intervenants possible et de solliciter davantage leur participation (MPO, 2005).

4.1.3 Municipalités et résidents du bassin versant

À l'échelle des municipalités, il est important de mettre en place la réglementation adéquate et de la faire respecter, notamment en ce qui a trait aux engrais d'usage résidentiel, au contrôle des sédiments, aux installations septiques et aux coupes forestières sur les terrains privés. Il est également possible de repenser l'aménagement du territoire en vue de respecter le principe de rejet « 0 » des eaux de ruissellement, c'est-à-dire de maintenir les eaux de drainage sur le terrain et de maximiser la percolation. Il est de plus en plus indispensable de mieux gérer le phosphore des eaux usées et d'assurer le bon fonctionnement des réseaux d'égouts pluviaux pour diminuer les surverses. De plus, il est important d'épurer les rejets liquides provenant des sites d'enfouissement et de gérer adéquatement les fossés routiers par la technique du tiers inférieur (Lapalme *et al.*, 2008; Solow, 2004). Partout où c'est possible dans le bassin versant, on doit privilégier le rétablissement du couvert forestier, qui joue un grand rôle dans la maîtrise des eaux de ruissellement. En fait, la bande riveraine ne devrait pas se limiter aux terrains en bordure de cours d'eau, mais plutôt être généralisée à tous les terrains qui sont situés dans le bassin versant et dont les eaux de surface ruissellent dans les fossés et les conduites pluviales (Lapalme *et al.*, 2008). Il faut également réduire la conversion et promouvoir la restauration des marais et d'autres zones tampon naturelles qui interceptent et séquestrent les nutriments avant qu'ils n'atteignent les océans (Solow, 2004). Puisqu'il est particulièrement ardu d'agir rapidement sur les changements climatiques, on devrait dès maintenant prendre des mesures pour réduire les sources de réchauffement de l'eau dans tout le bassin versant, en minimisant les zones asphaltées comme les stationnements et en recouvrant les sols sans protection végétale (Lapalme *et al.*, 2008). En zones côtières, il est également possible de sélectionner des méthodes de protection des infrastructures contre l'érosion et les événements extrêmes qui minimisent les impacts indésirables sur l'environnement (GC, 2008). D'autre part, plusieurs actions peuvent être entreprises directement par les résidents du bassin des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Par exemple, il est possible de réduire l'utilisation des produits ménagers à base de phosphate et d'azote, de conserver une grande part du couvert forestier lors d'une nouvelle construction, de protéger et de restaurer les bandes riveraines pour qu'elles puissent jouer pleinement leur rôle écologique, d'éliminer ou de végétaliser les murets de retenu en

béton, d'utiliser une barrière à sédiments pendant les travaux de sol et de participer au reboisement des espaces municipaux (Lapalme *et al.*, 2008).

4.2 Surveillance, prévision et atténuation des impacts des floraisons

Dans les sites coquilliers du Québec, trois organismes assurent la surveillance des toxines marines dans les algues et les mollusques : le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) est responsable de l'analyse toxicologique des mollusques transformés dans les usines et les commerces; l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) effectue la surveillance des mollusques toxiques dans les eaux canadiennes et dans les usines de transformation dont les produits sont vendus à l'extérieur de la province; et, l'Institut Maurice-Lamontagne du MPO surveille l'apparition des algues toxiques dans les eaux du Saint-Laurent grâce à un réseau de stations côtières. Lorsque la présence de toxines marines est signalée par l'ACIA, le MPO interdit alors immédiatement la récolte dans les secteurs coquilliers visés (Duchesne, 2000; Levasseur, 1996; Measures et Lair, 2008). De plus, l'Unité de recherche en santé publique du Centre hospitalier universitaire de Québec (CHUQ) a mis en œuvre un projet visant à favoriser la détection des cas d'intoxication et à diminuer les risques pour la santé des consommateurs de mollusques (Duchesne, 2000).

Lors de la marée rouge catastrophique de 2008, les spécialistes et les médias ont mené un excellent travail de sensibilisation, car il n'y a eu aucune intoxication humaine (Vallières, 2008). De plus, les efforts de la communauté scientifique sur le terrain ont été coordonnés grâce au Réseau québécois d'urgences pour les mammifères marins, dont la coordination est assurée par le Groupe de recherche et d'éducation sur les mammifères marins (GREMM). Les membres de ce réseau mis en place en 2004 compte notamment Pêches et Océans Canada, Parcs Canada, la Faculté de médecine vétérinaire de l'Université de Montréal à Saint-Hyacinthe, l'Institut national d'écotoxicologie du Saint-Laurent et le Réseau d'observation des mammifères marins (ROMM), auxquels se sont joints Environnement Canada, l'Agence canadienne d'inspection des aliments et l'Institut des biosciences marines du Conseil national de la recherche du Canada, à Halifax (MPO, 2008a; Saint-Pierre, 2008). Le Réseau a rapidement décelé cet épisode hors de l'ordinaire et a mis en place une cellule de gestion de crise pour documenter les mortalités animales, effectuer les échantillonnages et les analyses pathologiques et toxicologiques, ainsi que d'assurer la sécurité, l'information et la sensibilisation du public (de la Chenelière, 2010;

Measures et Lair, 2008). Étant donné l'étendue importante des rives de l'estuaire et du golfe, il est possible que des mortalités animales causées par d'autres marées rouges soient passées inaperçues au cours du temps. Il serait donc pertinent de compléter l'excellent travail accompli par le Réseau par un programme d'éducation pour former les différents utilisateurs du Saint-Laurent et le public à reconnaître les impacts des floraisons toxiques et à participer à l'enrichissement des connaissances sur ce phénomène (Shumway *et al.*, 2003).

Certains scientifiques travaillent actuellement au développement de modèles de prévision des marées rouges. Par exemple, la salinité qui pourrait être utilisée comme outil pour prédire la présence de *A. tamarense*, car ce paramètre reflète l'état général de la colonne d'eau en termes d'apport d'eau douce et de stabilité et démontre une forte corrélation négative avec la probabilité d'observer des floraisons (Weise *et al.*, 2002). De plus, un chercheur de l'Université Laval développe présentement un modèle tenant compte des conditions météorologiques et océanographiques (Thériault, 2008b). De tels outils pourraient aider les gestionnaires à intervenir plus rapidement pour atténuer les impacts.

Si une nouvelle marée rouge de l'ampleur de celle de 2008 se présentait à nouveau, nos technologies ainsi que nos systèmes d'intervention ne nous permettraient malheureusement pas de réduire les impacts sur la faune marine. Les conditions qui mettent fin à une floraison sont le broutage des organismes herbivores, le manque de lumière, le déclin de nutriments ou encore l'instabilité de la colonne d'eau (Anderson, 2004; Weise *et al.*, 2002). Dans un bassin ouvert de la taille de l'estuaire et du golfe, le seul facteur sur lequel l'homme peut agir est la limitation des intrants de nutriments. Mais une fois que ceux-ci ont atteint le milieu et que l'éclosion de la fleur d'eau a eu lieu, on n'y peut plus rien. D'autre part, il est impossible de limiter l'étendue d'une marée rouge, puisque les algues contaminées s'étendent de la surface à plusieurs mètres sous l'eau et ne peuvent donc pas être contenues par des estacades (Thériault, 2008b). De plus, il n'est pas question d'éloigner les échoueries de phoques dans des zones protégées puisque c'est en ingérant des poissons contaminés que les mammifères marins décèdent des effets de la toxine (Thériault, 2008a). Apparemment, une fois qu'une floraison est enclenchée, tout ce que nous pouvons faire est d'observer l'ampleur des dégâts. La seule atténuation possible réside dans l'évitement de la contamination humaine via la surveillance des mollusques et l'émission d'avis publics (Duchesne, 2000; Measures et Lair, 2008; MPO, 2008a).

4.3 Mobilisation de la population

Au cours de la marée rouge de 2008, la petite population locale et les visiteurs de passage dans la région se sont inquiétés de cette situation (Nolet, 2010). Par contre, à l'échelle de la province, peu de gens ont eu vent de l'évènement, qui a été bien peu médiatisé. À l'opposé des problèmes d'algues bleues dans les lacs, les effets de la marée rouge étaient moins préoccupants pour les citoyens, car ils avaient lieu loin des grands centres. Peut-être que si cet évènement avait eu lieu en 2007, durant un été de panique généralisée qui a entouré les algues bleu vert, les choses auraient été différentes. En effet, le gouvernement du Québec avait adopté en 2008 une nouvelle stratégie pour gérer la crise des cyanobactéries. En se basant sur les données scientifiques qui ont fait la preuve que les fleurs d'eau représentent un faible risque pour la santé des Québécois, les concentrations à ne pas dépasser ont été augmentées pour limiter le nombre de fermetures de plage. Le nombre de lacs « touchés » par les floraisons a donc diminué, occultant ainsi le nombre réel de plans d'eau affectés par cette grave détérioration de la santé des écosystèmes lacustres. La marée rouge de 2008 est donc survenue durant une période politique tendue, durant laquelle les autorités publiques semblaient chercher à éviter de s'attaquer aux sources principales de nutriments. Toutefois, cette attitude va totalement à l'encontre des résultats recherchés. Il faut plutôt maximiser l'information du public pour accélérer les actions de protection de cet écosystème fragile et des ressources et services que nous en tirons (Darier, 2010; Greenpeace, 2008). Il est vrai que dans le cas des algues rouges, l'effet anthropique direct est difficile à prouver et peu de recherches scientifiques ont creusé la question jusqu'à maintenant. Ce doute scientifique ne peut toutefois pas être utilisé pour nier le problème, le principe de précaution doit prôner et être appliqué dès maintenant par les gestionnaires (Darier, 2010). Enfin, pour vraiment changer les choses, la première étape consiste à reconnaître l'urgence du problème. L'appui des autorités en place est donc crucial pour mobiliser la population et responsabiliser les différents intervenants.

CONCLUSION

La marée rouge catastrophique de l'été 2008 dans l'estuaire du Saint-Laurent était exceptionnelle par sa forte concentration, son étendue, sa persistance et ses lourdes conséquences environnementales et économiques. L'objectif principal de l'analyse de cet évènement était de déterminer s'il s'agit d'un symptôme d'un développement non durable, susceptible de se reproduire dans les années à venir. La vérification de cette hypothèse est d'un intérêt primordial, car sa validation signifie qu'il est possible de renverser les tendances actuelles par la modification de certains usages.

Afin de mieux comprendre ce phénomène complexe, la première étape fut de rassembler les connaissances existantes sur le cycle de vie, les conditions de croissance et l'évolution des effets nuisibles associés aux floraisons de l'espèce en cause. À ce sujet, la description du cycle vital et du mode d'alimentation mixotrophe de ce dinoflagellé a révélé qu'il possède un avantage compétitif pour persister dans le milieu par rapport à d'autres espèces. De plus, la dispersion de ses kystes par les courants vers la région de Tadoussac au cours des dernières années pourrait expliquer le lieu surprenant de l'éclosion de 2008. D'autre part, il a été démontré que les fleurs d'eau d'*A. tamarense* sont reliées à la combinaison de plusieurs variables environnementales clés, notamment la stabilité de la colonne d'eau et la disponibilité de certains nutriments, et que l'étendue des floraisons est contrôlée par la durée de ces conditions. La saxitoxine produite par *A. tamarense* cause l'intoxication paralysante par les mollusques, qui représente un danger mortel chez l'humain et dans la chaîne alimentaire marine, particulièrement inquiétant pour les espèces menacées comme le béluga. La surveillance et la fermeture des sites d'aquaculture et de cueillette artisanale, les services d'avertissement du public ainsi que les traitements médicaux des personnes exposées, représentent des coûts substantiels pour la société. Les régions côtières plus touchées que l'estuaire et le golfe subissent également une réduction du tourisme et des services qui y sont reliés.

En second lieu, l'évolution des caractéristiques naturelles et humaines du bassin Grands Lacs et Saint-Laurent a été étudiée. Il en ressort que cet environnement supporte une vaste biodiversité, qui est toutefois menacée par une multitude de perturbations. Malgré une période particulièrement froide au début des années 1990, les suivis à long terme de la température moyenne de l'air et des masses d'eau indiquent une inquiétante tendance au réchauffement. On observe également une intensification de l'appauvrissement des

teneurs en oxygène des eaux profondes en raison du réchauffement climatique ainsi qu'à l'augmentation du flux de matière organique découlant d'activités humaines. De plus, l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère favorise sa dissolution à la surface des océans, ce qui acidifie l'eau de mer. Les changements climatiques favorisent aussi l'augmentation des précipitations et l'intensification des « coups d'eau » dans le sud du Québec et dans le golfe. L'augmentation du niveau d'eau dans l'estuaire et le golfe favorisera l'érosion des rives. En outre, une vaste gamme d'activités humaines pose des menaces importantes à l'intégrité du système Saint-Laurent. Plusieurs effets sont déjà observés dans l'écosystème. Par exemple, il y a eu une diminution générale des ratios de diatomées par rapport aux dinoflagellés dans l'estuaire maritime depuis 1997. Cette transition est indicatrice d'un apport excessif d'éléments nutritifs et de la stratification accrue de la colonne d'eau.

La troisième étape fut la détermination des causes et du potentiel de récurrence d'une marée rouge meurtrière dans l'estuaire. L'analyse de la littérature nationale et internationale permet de conclure que des activités humaines favorisant des conditions climatiques extrêmes, une augmentation des intrants de nutriments et une perturbation générale de l'équilibre de l'écosystème ont sans doute favorisé la floraison de 2008 et risquent d'accentuer ce problème dans les années à venir. De plus, l'eutrophisation peut aggraver la toxicité d'une marée rouge, car la production de saxitoxine par *A. tamarens* peut être de 5 à 10 fois plus élevée dans des conditions d'excès de composés azotés.

Afin d'éviter qu'une situation d'une ampleur aussi catastrophique ne se répète dans le futur, les principes de précaution et de prévention nous commandent de maximiser les efforts de prévention. En effet, la réduction des rejets de nutriments et des sources de chaleur peut se faire conjointement par les secteurs commerciaux, industriels, agricoles et des ressources naturelles, ainsi que par les gouvernements, les municipalités et les résidents du bassin versant des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Il est également important de maintenir et d'améliorer la performance des activités de surveillance, de prévision et d'atténuation des impacts des floraisons toxiques. Un plan d'intervention multidisciplinaire a donc été proposé pour augmenter les efforts de protection de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, ainsi que les ressources que nous en tirons. Un développement plus durable des activités humaines ne peut cependant se faire sans la participation des acteurs concernés. Ainsi, il est primordial de mieux informer les citoyens afin d'accélérer la mise en œuvre des solutions.

À l'instar des fleurs d'eau d'algues bleu vert observées dans de nombreux lacs, l'augmentation des floraisons d'algues rouges en milieu marin peut être considérée comme un signal d'alarme démontrant une détérioration globale de l'écosystème. Néanmoins, la part de responsabilité attribuable aux facteurs anthropiques dans l'apparition de la marée rouge de 2008 ne fait pas encore l'unanimité dans la communauté scientifique. Bien que l'absence de certaines interrelations précises ait quelque peu limité le caractère significatif des résultats, les objectifs spécifiques de la présente étude ont tous été atteints et ont permis la réalisation de l'objectif général. En effet, le lien direct entre les activités humaines et la floraison d'*Alexandrium tamarense* dans l'estuaire n'a pas encore été clairement démontré. Néanmoins, la connaissance des multiples impacts cumulatifs suffit pour enclencher les actions correctrices le plus rapidement possible. Il serait donc plus pertinent de chercher à mesurer le ralentissement des signes de détérioration, ou mieux encore, les signes d'amélioration de l'état de l'environnement, plutôt que d'attribuer des efforts fastidieux dans la recherche d'une preuve irréfutable. À mon avis, la société gagnerait davantage à investir dans la recherche et le développement d'outils efficaces pour réduire les menaces qui pèsent sur ce précieux écosystème.

RÉFÉRENCES

- Agence européenne de l'environnement (AEE) (2006). Priority issues in the Mediterranean environment. Chapter 6. Key Issue: Harmful Algal Blooms, Copenhagen, p.51-54, ISBN 92-9167-812-0. [En ligne]. http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_4/at_download/file (Page consultée le 15 mai 2010).
- Anderson, D.M. (2004). The Growing Problem of Harmful Algae. Tiny plants pose potent threat to those who live in and eat from the sea. *Oceanus Magazine*, Woods Hole Oceanographic Institution. [En ligne]. <http://www.whoi.edu/page.do?pid=11913&tid=282&cid=2483> (Page consultée le 20 mai 2010).
- Anderson, D.M., Glibert, P.M. and Burkholder, J.M. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, vol. 25, p. 704-726. [En ligne]. http://www.whoi.edu/cms/files/Anderson_etal_2002_Estuaries_29903.pdf (Page consultée le 14 juillet 2010).
- Beauchamp, J. (2001). Les molécules humiques. [En ligne]. <http://www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/humus.htm> (Page consultée le 12 juillet 2010).
- Bernier, L., Lachance, P., Quilliam, L. et Gingras, D. (1998). La contribution des activités urbaines à la détérioration du Saint-Laurent : Rapport technique (Enjeu : L'État du Saint-Laurent). Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent, Environnement Canada, Pêches et Océans Canada, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Saint-Laurent Vision 2000, ISBN : 0-662-82762-7, 156 p.
- Bouchard, H. et Roy, L. (1999). La contribution des activités agricoles à la détérioration du Saint-Laurent. (Enjeu : L'État du Saint-Laurent). Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent, Environnement Canada, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Suivi de l'écosystème – 1998-2003, Saint-Laurent Vision 2000, ISBN : 0-662-82763-5, 16 p.
- Bushaw-Newton, K.L. and Sellner, K.G. (1999). Harmful Algal Blooms. In NOAA's State of the Coast Report. Silver Spring, National Oceanic and Atmospheric Administration. [En ligne]. http://oceanservice.noaa.gov/websites/retiredsites/sotc_pdf/hab.pdf (Page consultée le 20 mai 2010).
- Chambers, P.A., Guy, M., Roberts, E.S., Charlton, M.N., Kent, R., Gagnon, C., Grove, G. et Foster, N. (2001). Les éléments nutritifs et leurs effets sur l'environnement au Canada. Environnement Canada, Ottawa, Ontario, ISBN 0-662-85635-X, 282 p. [En ligne]. <http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=Fr&xml=96B4B2A2-39C4-46BA-B8D1-A0213B6C7CBE> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Chevalier, P. (1996). Technologies d'assainissement et de prévention de la pollution, Éditions Télé-Université, Ste-Foy (Québec), Canada, ISBN 2-7624-0870-9, 440 p.
- Cliche, J.-F. (2009). Une nouvelle marée rouge improbable. Publié le 13 octobre 2009, *Le Soleil*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/le-soleil/actualites/environnement/200910/13/01-910943-une-nouvelle-maree-rouge-improbable.php> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Comité consultatif du Programme d'action national du Canada pour la protection du milieu marin contre la pollution due aux activités terrestres (PAN) (2000). Programme d'action national du Canada pour la protection du milieu marin contre la pollution due aux activités terrestres (PAN). ISBN : 0-662-84770-9, 141 p.

- Darier, E. (2010). Causes et conséquences de la marée rouge de 2008 et solutions possibles. Communication orale. Entrevue téléphonique menée par Sophie Paré avec Monsieur Eric Darier, directeur de Greenpeace Québec et directeur de la campagne Agriculture de Greenpeace, 21 juin 2010, Gatineau.
- de la Chenelière, V. (15 juin 2010). *La réaction du GREMM durant la marée rouge de 2008*. Courrier électronique.
- Duchesne, J.-F. (2000). Surveillance des cas d'intoxication liés à la consommation des mollusques du Saint-Laurent. Unité de recherche en santé publique, Centre de recherche du CHUQ, Pavillon du CHUL, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 10, n° 9, p. 1-3. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol10_09/vol10_9_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Dufour, R., Benoît, H., Castonguay, M., Chassé, J., Devine, L., Galbraith, P., Harvey, M., Larouche, P., Lessard, S., Petrie, B., Savard, L., Savenkoff, C., St-Amand L. and Starr, M. (2010). Ecosystem Status and Trends Report: Estuary and Gulf of Saint Lawrence Ecozone. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res., ISSN 1499-3848, 116 p. [En ligne]. http://www.dfo-mpo.gc.ca/CSAS/Csas/publications/resdocs-docrech/2010/2010_030_b.pdf (Page consultée le 15 août 2010).
- Faivre, J. et Bouchard, G. (2001). L'industrie maritime met en place une mesure concrète pour diminuer l'érosion des berges. Transports Québec, Pêches et Océans Canada, Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n° 9, p. 1-3. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol11_09/vol11_9_f.PDF (Page consultée le 15 mai 2010).
- Francoeur, L.G. (2008). Des algues bleues tombées des cieux. Les pluies acides contribuent intensément au problème. Publié le 12 février 2008, *Le Devoir*. [En ligne]. <http://www.ledevoir.com/societe/175798/des-algues-bleues-tombees-des-cieux> (Page consultée le 12 août 2010).
- Gagné, J.-P. (2010). Liens entre les substances humiques et les fleurs d'eau d'*Alexandrium tamarense*. Communication orale. Entrevue téléphonique menée par Sophie Paré avec Monsieur Jean-Pierre Gagné, professeur en géochimie organique marine à l'ISMER, 25 juin 2010, Gatineau.
- Gagnon, M. (1996). Bilan régional - Estuaire maritime du Saint-Laurent. Zone d'intervention prioritaire 18. Centre Saint-Laurent, Environnement Canada, Plan Saint-Laurent, ISBN : 0-662-81496-7, 100 p. [En ligne]. http://www.slv2000.qc.ec.gc.ca/zip/bilans_pdf/Bilan_18_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Geraci, J.R., Anderson, D.M., Timperi, R.J., St. Aubin, D.J., Early, G.A., Prescott, J.H. and Mayo C.A. (1989). Humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) fatally poisoned by dinoflagellate toxin. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 46, p. 1895-1898.
- Goldemberg, J., Johansson, T.B., Reddy, A.K.N. and Williams, R.H. (2001). Energy for the New Millennium. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, vol. 30, n° 6, p. 330-337.
- Gouvernement du Canada (GC) (2008). Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007. ISBN : 978-0-332-07443-4. 452 p. [En ligne]. <http://adaptation2007.mcan.gc.ca> (Page consultée le 2 octobre 2010).
- Gouvernement du Canada et Gouvernement du Québec (GC et GQ) (2006). Plan Saint-Laurent pour un développement durable 2005-2010. Plan Saint-Laurent, ISBN: 0-

- 662-77899-5, 14 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/diverses/Brochure_PSL_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Gouvernement du Québec (GQ) (2010). Bilan d'aménagement forestier durable au Québec 2000-2008. ISBN 978-2-550-58185-7, 290 p. [En ligne]. http://www.forestierenchef.gouv.qc.ca/images/stories/BAFD/accueil/bilan_2000-2008.pdf (Page consultée le 20 octobre 2010).
- Greenpeace (2008). Algues rouges dans le Saint-Laurent. Un dépotoir d'engrais azotés. [En ligne]. http://www.greenpeace.org/canada/en/recent/saint_laurent_algues_rouges/ (Page consultée le 15 juin 2010).
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2007). Bilan 2007 des changements climatiques : les bases scientifiques physiques. Résumé à l'intention des décideurs. ISBN 92-9169-221-2, 25 p. [En ligne]. http://www.developpement-durable.gouv.fr/publications/IMG/pdf/resume_groupe_GIEC.pdf (Page consultée le 15 septembre 2008).
- Gulland, F.M.D. and Ailsa, J.H. (2007). Is Marine Mammal Health Deteriorating? Trends in the Global Reporting of Marine Mammal Disease. Review. *Ecohealth*, vol. 4, p.135-150.
- Harvey, J.-M. (2000). Le semis direct de soya, c'est facile, facile...et payant ! [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Le%20semis%20direct%20de%20soya.htm> (Page consultée le 12 mars 2009).
- Ingram, J., Holmes, K., Jean, M., Létourneau, G. et Savage, C. (2004). La superficie et la fragmentation des milieux humides riverains du système Grands Lacs-Saint-Laurent. Environnement Canada, Plan St-Laurent (PSL), 3 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/sl_obs/sesl/publications/fiches_ecosysteme/milieux_hum/fiche001_1_f.html (Page consultée le 15 mai 2010).
- Institut Maurice-Lamontagne (IML) (1996a). *Alexandrium* cause des mortalités de lançons et de goélands en Gaspésie. *Nouvelles des sciences*, vol. 7, n° 16, 2 p.
- Institut Maurice-Lamontagne (IML) (1996b). Intoxication paralysante par les mollusques chez le maquereau. *Nouvelles des sciences*, vol. 7, n° 13, 2 p.
- Kwong, R.W.M., Wang, W.-X., Lam, P.K.S. and Yu, P.K.N. (2006). The uptake, distribution and elimination of paralytic shellfish toxins in mussels and fish exposed to toxic dinoflagellates. *Aquatic Toxicology*, vol. 80, n° 1, p. 82-91.
- Lapalme R., De Sève, M., Girard, J.-F., Lefebvre, D., Legaré, F., Nault, J., Prince, M. et Rousseau, M. (2008). Algues bleues, Des solutions pratiques. Bertrand Dumont éditeur, Bouquins verts, ISBN 978-2-923382-25-8, 255 p.
- Levasseur, C. (1996). Biologie marine : Applications aux eaux du Saint-Laurent. Centre collégial de développement de matériel didactique (Montréal) et Centre spécialisé des pêches (Grande-Rivière), ISBN 2-89470-020-2, 247 p.
- Loi fédérale sur le développement durable*, 2008, ch. 33.
- Loi sur le développement durable*, L.R.Q., c. D-8.1.1.
- MacRae, R., Martin, R., Macey, A., Beauchemin, R. et Christianson, R. (2002). Plan stratégique national pour le secteur canadien de l'agriculture et de l'alimentation

- biologiques, *In* Centre d'agriculture biologique du Canada (CABC), [En ligne] http://www.oacc.info/reportfinal_f.pdf (Page consultée le 5 février 2009).
- Measures, L. and Lair, S. (2008). Multispecies mortalities associated with saxitoxin intoxication due to a toxic algal bloom of *Alexandrium tamarense*. *In* International Society for Infectious Diseases (ISID). *ProMED Digest*, vol. 2008, n° 388. [En ligne]. http://www.promedmail.org/pls/apex/f?p=2400:1202:5503985608294938::NO::F2400_P1202_CHECK_DISPLAY,F2400_P1202_PUB_MAIL_ID:X,73936 (Page consultée le 15 juin 2010).
- Michaud, S., Levasseur, M., Doucette, G. and Cantin, G. (2002). Particle size fractionation of paralytic shellfish toxins (PSTs): seasonal distribution and bacterial production in the St. Lawrence estuary, Canada. *Toxicon*, vol. 40, p.1451-1462.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2004). Portrait global de la qualité de l'eau des principales rivières du Québec. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/global-2004/Influence2004.htm#influence> (Page consultée le 12 novembre 2008).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2008). Écoconditionnalité. *In* Production animale et végétale. Mesures d'appui. [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Productions/Agroenvironnement/mesuresappui/ecoconditionnalite/> (Page consultée le 25 mars 2009).
- Ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) (2010a). Une marée rouge mortelle dans l'estuaire du Saint-Laurent. *In* Secteur des sciences. Rapport annuel 2008-2009. ISBN 978-1-100-51025-5, p.16-17. [En ligne]. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/science/publications/annualreport-rapportannuel/ar-ra0809/ar-ra0809-fra.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) (2010b). Évaluation de l'hypoxie dans les eaux marines canadiennes. *In* Secteur des sciences. Rapport annuel 2008-2009. ISBN 978-1-100-51025-5, p.16-17. [En ligne]. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/science/publications/annualreport-rapportannuel/ar-ra0809/ar-ra0809-fra.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) (2009). Recycler comme dame nature : le projet d'aquaculture multitrophique intégrée. [En ligne]. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/science/Publications/article/2007/14-03-2007-fra.htm> (Page consultée le 15 octobre 2010).
- Ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) (2008). Floraison d'algues toxiques dans l'estuaire du Saint-Laurent : conclusions des experts (Septembre 2008), [En ligne]. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/media/back-fiche/2008/algae-algues-fra.htm> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) (2005). Le golfe Saint-Laurent, un écosystème unique. ISBN 0-662-69499-6. [En ligne]. <http://www.glf.dfo-mpo.gc.ca/f0006095#2-2> (Page consultée le 15 octobre 2010).
- Ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) (2003). Bonnes pratiques de gestion, Transformation des produits marins. *In* Région du Golfe. [En ligne]. <http://www.glf.dfo-mpo.gc.ca/f0006296> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) (1996). État de l'océan : Atlantique Nord-Ouest. *In* Pêches de l'Atlantique, Rapport sur l'état des stocks. 7 p. [En ligne].

- http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas/Csas/etat/1996/SSR_1996_041_F.pdf (Page consultée le 25 octobre 2010).
- Moreault, É. (2009). Le Saint-Laurent encore « vulnérable » à la pollution. Publié le 30 juin 2009, *Le Soleil*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/le-soleil/actualites/environnement/200906/30/01-880288-le-saint-laurent-encore-vulnerable-a-la-pollution.php> (Page consultée le 25 mai 2010).
- Nolet, V. (15 juin 2010). *La réaction du ROMM durant la marée rouge de 2008, les causes et le potentiel de récurrence d'un tel événement*. Courrier électronique.
- Plan St-Laurent (PSL) (2008). Portrait global de l'état du Saint-Laurent 2008 : Eau, sédiments, rives, ressources biologiques et usages. Comité de concertation Suivi de l'état du Saint-Laurent, Environnement Canada, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Pêches et Océans Canada et Stratégies Saint-Laurent, 30 p., ISBN 978-0-662-04763-6 [En ligne]. http://www.planstlaurent.gc.ca/sl_obs/sesl/publications/portrait/2008/Portrait_global_2008_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Plan Saint-Laurent (PSL) (2004). Document d'orientation sur la gestion intégrée du dragage sur le Saint-Laurent. Groupe de travail sur la gestion intégrée du dragage et des sédiments, ISBN : 2-550-43518-4, 25 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.gc.ca/centre_ref/publications/diverses/Orientations_dragage_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Radio-Canada.ca (2010). Golfe du Saint-Laurent. Des scénarios catastrophiques. 9 novembre 2010. [En ligne]. <http://www.radio-canada.ca/regions/atlantique/2010/11/09/002-ATL-old-harry-risques.shtml> (Page consultée le 10 novembre 2010).
- Robichaud, A. et Drolet, R. (1998). Rapport sur l'état du Saint-Laurent - Les fluctuations des niveaux d'eau du Saint-Laurent. Saint-Laurent Vision 2000, Environnement Canada, Pêches et Océans Canada, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, ISBN : 0-662-82761-9, 16 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.gc.ca/centre_ref/publications/diverses/enjeu_niveauxdeau_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Regroupement des organismes de bassin versant du Québec (ROBVQ) (2010). Le ROBVQ. Planifier, Agir, Tous ensemble. [En ligne]. <http://www.robvq.qc.ca/> (Page consultée le 16 septembre 2010).
- Roy, S. (11 juin 2010). *Les causes de la marée rouge de 2008*. Courrier électronique.
- Saint-Laurent Vision 2000 (SLV2000) (2003). Le Saint-Laurent et la santé humaine, l'état de la question. Domaine d'intervention Santé humaine. ISBN : 0-662-75722-X, 43 p. [En ligne]. http://www.slv2000.qc.ca/bibliotheque/centre_docum/phase3/bilan_sante_humaine/St_Laurent_f.pdf (Page consultée le 25 mai 2010).
- Saint-Pierre, M. (2008). Alerte rouge dans le Saint-Laurent. Publié le 16 août 2008, *Le Soleil*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/le-soleil/200809/08/01-662529-alerte-rouge-dans-le-saint-laurent.php> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (CBD) (2010). 3ème édition des Perspectives mondiales de la diversité biologique. Montréal, ISBN-92-9225-220-8, 94 p.

- Sellner, K.G., Doucette, G.J. and Kirkpatrick, G.J. (2003). Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 30, n° 7, p.383-406.
- Shumway, S. E., Allen, S.M. and Boersma, P.D. (2003). Marine birds and harmful algal blooms: sporadic victims or under-reported events? *Harmful Algae*, vol. 2, no 1, p. 1-17.
- Société de développement économique du Saint-Laurent (SODES) (s.d.). Caractéristiques du fleuve. Système hydrographique. [En ligne]. <http://www.lesaint-laurent.com/pages/bassinsversants.asp> (Page consultée le 10 octobre 2010).
- Solow, A.R. (2004). Red Tides and Dead Zones. The coastal ocean is suffering from overload of nutrients. *Oceanus Magazine*, Woods Hole Oceanographic Institution. [En ligne]. <http://www.whoi.edu/page.do?pid=11913&tid=282&cid=2487> (Page consultée le 20 mai 2010).
- Thériault, C. (2008a). Plus de 300 km² de marée rouge dans le fleuve, Publié le 20 août 2008, *Le Soleil*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/le-soleil/200809/08/01-665485-plus-de-300-km2-de-maree-rouge-dans-le-fleuve.php> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Thériault, C. (2008b). Algues rouges: la toxicité est prouvée. Publié le 04 septembre 2008, *Le Soleil*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/environnement/climat/200809/04/01-20456-algues-rouges-la-toxicite-est-prouvee.php> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Tirado, R. (2008) Zones mortes: Comment les engrais agricoles tuent nos rivières, lacs et océans. Laboratoires de recherches de Greenpeace, Université d'Exeter, Royaume-Uni, ISBN 978-0-9732337-8-0, 25 p. [En ligne] <http://www.greenpeace.org/raw/content/canada/fr/documents-et-liens/documents/zones-mortes.pdf> (Page consultée le 2 mai 2010).
- Vallières, É. (2008). La « marée rouge » du mois d'août: un phénomène naturel dans un contexte exceptionnel. *UQAR Info*, 4 novembre 2008. [En ligne]. <http://www.uqar.gc.ca/uqar-info/1108/Mareerouge.asp> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Van Dolah, F.M. (2000). Marine Algal Toxins: Origins, Health Effects, and Their Increased Occurrence. *Environmental Health Perspectives Supplements*, vol.108, n° S1, p.133-141. [En ligne]. <http://ehp.niehs.nih.gov/members/2000/suppl-1/133-141vandolah/vandolah-full.html> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Weise, A.M., Levasseur, M., Saucier, F.J., Senneville, S., Bonneau, E., Roy, S., Sauvé, G., Michaud, S., and Fauchot, J. (2002). The link between precipitation, river runoff, and blooms of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* in the St. Lawrence. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 59, n° 3, p. 464-473.
- Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) (2006). Harmful Algae and Red Tides Primer. [En ligne]. <http://www.whoi.edu/page.do?pid=11913&tid=282&cid=12506> (Page consultée le 20 mai 2010).

ANNEXE 1

BIBLIOGRAPHIE

- Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) (2010). [En ligne]. <http://www.inspection.gc.ca/francais/tocf.shtml> (Page consultée le 25 mai 2010).
- Agri-Réseau (2010). Documents sur l'agroenvironnement. [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/default.aspx> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) [En ligne]. http://www.agr.gc.ca/index_f.php (Page consultée le 25 mai 2010).
- Anctil, F. (2008). L'eau et ses enjeux, Les presses de l'Université Laval, ISBN 978-2-7637-8493-9, 228 p.
- Baribeau, T. (2001). Le Réseau ObservAction de la Biosphère. In Biosphère, Environnement Canada, Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 12, n° 2, p. 1-3. [En ligne] http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol12_02/vol12_2_f.PDF (Page consultée le 15 mai 2010).
- Bastien, H., Langevin, R., Pouliot, G. et Robillard, L. (2002). L'importance des organismes non gouvernementaux et des plans directeurs dans la conservation du Saint-Laurent. In Société de la faune et des parcs du Québec, Environnement Canada, Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 13, n° 1, p. 1-4. [En ligne] http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol13_01/vol13_1_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Beaulieu, R., Breune, I. et Guillou, M. (2007). Avaloirs et puisards, [En ligne]. http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Avaloirs_puisards_AAC2007.pdf (Page consultée le 28 février 2009).
- Bergeron, L. (2000). Le Comité ZIP Ville-Marie - La contamination des cours d'eau de la CUM par les eaux de débordement. Comité ZIP Ville-Marie, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n° 2, p. 6-7. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol11_02/vol11_2_f.pdf (Page consultée le 25 mai 2010).
- Bernier, A. et D'Amour, J. (2000). La prévention de la pollution, au cœur des activités du domaine d'intervention industriel et urbain. Environnement Canada, Ministère de l'Environnement du Québec, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n° 2, p. 1-3.
- Bernier, A. et D'Amour, J. (2000). Le programme de reconnaissance environnementale des établissements industriels. Environnement Canada, Ministère de l'Environnement du Québec, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n° 2, p. 4-5.
- Bibeault, F., Duchesne, J.-F., Gauvin, D., Gingras, S., Grondin, J., Laliberté, C., Levallois, P. et Lévesque, B. (2003). Suivi des usages et des perceptions du Saint-Laurent par la population riveraine. Centre de recherche du CHUQ, Unité de recherche en santé publique, Saint-Laurent Vision 2000, Santé Canada, 261 p. [En ligne]. http://slv2000.qc.ca/bibliotheque/centre_docum/phase3/enquete_sante_sl_2/faits_saillants/accueil_f.htm (Page consultée le 15 mai 2010).
- Bibeault, J.-F., Houngué, S. et Lachapelle, C. (2002). Le Plan d'action SLV 2000, phase III: une contribution originale au développement durable - Évaluation des avantages et des coûts socioéconomiques. Environnement Canada, Ministère de

- l'Environnement du Québec, Saint-Laurent Vision 2000, ISBN 0-662-88085-4, 51 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/diverses/etude_socioeconomique/Etude_se_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Bisson, C. (2008). Modalités terrains et acteurs impliqués dans la mise en œuvre des actions de lutte à l'érosion. Communication orale. *Entrevue menée par Sophie Paré et Simon C. Tétreault avec Madame Caroline Bisson, Biologiste, Agente en agroenvironnement pour l'Union des Producteurs Agricoles (UPA)*, 8 décembre 2008, bureau de la Fédération de l'UPA de Saint-Hyacinthe, Saint-Hyacinthe.
- Blasco, D., Levasseur, M., Bonneau, E., Gelinas, R. and Packard, T.T. (2003). Patterns of paralytic shellfish toxicity in the St. Lawrence region in relationship with the abundance and distribution of *Alexandrium tamarens*. *Scientia Marina (Barcelona)*, vol. 67, no 3, p. 261-278.
- Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I. and Roy, A.G. (2010). Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology*, vol. 384, n° 1-2, p. 65-83.
- BPR-Infrastructure inc. (2008). Suivi 2007 du Portrait agroenvironnemental des fermes du Québec : rapport présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, à l'Union des producteurs agricoles et à Agriculture et Agroalimentaire Canada. ISBN 978-2-550-53393-1, 72 p. [En ligne]. http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/414BF0F8-B1CD-4457-8C09-55F227926648/0/Rp_final_0811.pdf (Page consultée le 23 mai 2010).
- Browman, I.H. (1996). Effets des UVB sur les ressources marines. Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin SCMO*, vol. 24, n° 1, p. 1-2.
- Bureau de coordination du PSL (2003). Rapport quinquennal 1998-2003 - Saint-Laurent Vision 2000. Gouvernement du Canada, Gouvernement du Québec, ISBN 0-662-88227-X, 45 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/diverses/rapport_quin_1998_2003/Rapport_quinquennal_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Bureau de coordination du PSL (2008). Rapport biennal 2005-2007. Gouvernement du Canada, Gouvernement du Québec, ISBN 978-2-550-52171-6, 31 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/rap_bien_05_07/Rap_biennal_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Burton, J. (1997). La participation du public à la gestion environnementale du fleuve Saint-Laurent : Les zones d'intervention prioritaire (ZIP). Saint-Laurent Vision 2000, 7e Entretien du Centre Jacques Cartier, p. 147-161.
- Cantin, J.-F., et Bouchard, A. (2002). L'évolution des niveaux et débits du fleuve. Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Saint-Laurent Vision 2000, ISBN 0-662-88171-0, 8 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/sl_obs/sesl/publications/fiches_indicateurs/niveaux_debits_2002_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Cantin, J.-F., Mingelbier, M. et Morin, J. (2000). La modélisation de l'écosystème fluvial : un outil de science et de gestion. Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Société de la faune et des parcs du Québec, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n° 4, p. 4-5.

- Carignan, R. and Lorrain, S. (2000). Sediment Dynamics in the Fluvial Lakes of the St. Lawrence River: Accumulation Rates and Characterization of the Mixed Sediment Layer. Saint-Laurent Vision 2000, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 57 (suppl. 1), p. 63-77.
- Carlowicz, M. and Lippsett, L. (2008). Researchers Successfully Forecast 2008 Red Tide. New tool provides early warning of harmful algal bloom along New England coast. *Oceanus Magazine*, Woods Hole Oceanographic Institution. [En ligne]. <http://www.whoi.edu/page.do?pid=11913&tid=282&cid=47406> (Page consultée le 20 mai 2010).
- Cartier, J.-F. (1999). La cueillette récréative des mollusques sur la rive nord de l'estuaire du Saint-Laurent. Régie régionale de la santé et des services sociaux de la Côte-Nord, Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 10, n° 4, p. 4-5. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol10_04/vol10_4_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2008). Les sources, les formes et la gestion du phosphore en milieu agricole, [En ligne]. <http://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC019.pdf> (Page consultée le 6 mars février 2009).
- Chouinard, M., Gagné, C., Hubert, I., Leclerc, J.-M. et Racine, R. (2000). Les comités ZIP Baie des Chaleurs, des Îles-de-la-Madeleine et de la rive nord de l'estuaire – Sensibilisation aux risques pour la santé associés à la consommation de mollusques. Comité ZIP Baie des Chaleurs, Santé Canada, Comité ZIP des Îles-de-la-Madeleine, Institut national de santé publique du Québec, Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n° 4, p. 6-7.
- Clubs-conseils en agroenvironnement (CCAÉ) (s.d). Les Clubs Conseils, [En ligne]. <http://www.clubsconseils.org/accueil/> (Page consultée le 10 décembre 2008).
- Comité consultatif du Programme d'action national du Canada pour la protection du milieu marin contre la pollution due aux activités terrestres (PAN) (2004). Protection des milieux côtiers et marins du Canada, ISBN 0-662-76655-5, 22 p.
- Comité consultatif Programme d'action national du Canada pour la protection du milieu marin contre la pollution due aux activités terrestres (PAN) (2001). Mise en œuvre du Programme d'action national pour la protection du milieu marin contre la pollution due aux activités terrestres (PAN), Rapport destiné à la réunion d'examen intergouvernementale de 2001 du Programme d'action mondial, ISBN 0-662-86293-7, 77 p.
- Comité ZIP de la Baie des Chaleurs (2000). Plan d'intervention sur les risques à la santé associés à la consommation de mollusques. 25 p.
- Commission de protection du territoire agricole (CPTAQ) (2007). Géomatique. In Gouvernement du Québec. [En ligne]. http://www.cptaq.gouv.qc.ca/index.php?id=176&no_cache=1 (Page consultée le 1^{er} juin 2009).
- Commission on the Nitrates in Groundwater (2008). The Report of the Commission on Nitrates in Groundwater (in PEI). June 2008. Prince Edward Island. 84 p. [En ligne]. <http://www.gov.pe.ca/photos/original/cofNitrates.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).

- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) (2000). Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. 520 p.
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) (1995). Feuille technique, AGDEX 554 – Génie rural – Section environnement et ressources agricoles : Drainage de surface, ISBN 2-89457-025-2. [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/02-9512.pdf> (Page consultée le 20 mars 2009).
- Conseil national de recherches Canada (CNRC) (2010). Institut des biosciences marines du CNRC. [En ligne]. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/ibm.html> (Page consultée le 25 mai 2010).
- Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) (2010). Rôles et mandats du CDAQ. [En ligne]. <http://www.cdaq.qc.ca/> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Côté, G. (1996). Les diagnostics agro-environnementaux des bassins versants étudiés par SLV 2000. Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Saint-Laurent Vision 2000. *Bulletin Le Fleuve*, vol. 6, n° 2, p. 5. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol06_02/vol6_2_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Dauphin, D. (2000). Influence de la navigation commerciale et de la navigation de plaisance sur l'érosion des rives du Saint-Laurent dans le tronçon Cornwall – Montmagny. Service du transport maritime et aérien. Transports Québec. 103 p.
- De Guise, J., Hudon, M. et Roy J.-Y. (2003). Un bilan axé sur le partenariat et la concertation. Environnement Canada, Stratégies Saint-Laurent, Ministère de l'Environnement du Québec, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 13, n° 5, p. 1-4. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol13_05/vol13_5_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Duchesne, J.-F., Rhainds, M. et Dewailly, É. (2000). Programme de surveillance des cas d'intoxication aux toxines marines dans le Saint-Laurent, Phase I - 1999, Résultats et évaluation du programme. Centre de recherche du Pavillon CHUL, Unité de recherche en santé publique, Centre de recherche du CHUQ, Pavillon du CHUL, Saint-Laurent Vision 2000, 30 p.
- Duchesne, J.-F., Rhainds, M. et Dewailly, É. (2002). Programme de surveillance des maladies causées par les mollusques - Résultats PHASE I (1999) et PHASE II (2000) - Résumé. Centre de recherche du Pavillon CHUL, Saint-Laurent Vision 2000, 90 p. [En ligne]. http://slv2000.qc.ca/bibliotheque/centre_docum/phase3/rapport_mollusques/accueil_f.htm (Page consultée le 15 mai 2010).
- Duchesne, J.-F., Tremblay, T., Rhainds, M. et Dewailly, É. (1999). Présence des toxines marines dans les estuaires et le golfe du Saint-Laurent et implications pour la santé humaine. Unité de recherche en santé publique, Centre de recherche du CHUQ, Pavillon du CHUL, Saint-Laurent Vision 2000, 41 p.
- Environnement Canada et Ministère de l'Environnement du Québec (EC et MEQ) (1997). Dans la foulée du colloque. Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 7, n° 2, p. 1. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol07_02/vol7_2_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Environnement Canada (EC) et Ministère de l'Environnement du Québec (EC et MEQ) (1997). La pollution industrielle, l'industrie fait-elle sa part ?, Saint-Laurent Vision

- 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 7, n° 2, p. 8-9. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol07_02/vol7_2_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Environnement Canada (EC) et Ministère de l'Environnement du Québec (EC et MEQ) (1997). La prise en charge du fleuve par la population est-elle pensable ?, Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 7, n° 2, p. 11, [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/entre_ref/publications/lefleuve/vol07_02/vol7_2_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Erez, C., Roy, S., Levasseur, M. and Anderson, D.M. (1998). Control of germination of *Alexandrium tamarens* cysts from the Lower St. Lawrence Estuary (Canada). *J. Phycol.*, vol. 34, p. 242-249.
- Faivre, J. et Mazaudier, L. (2001). Analyse comparative des pressions environnementales liées au transport de marchandises dans l'axe du Saint-Laurent. Transports Québec, Pêches et Océans Canada, Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n° 10, p. 4-5. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol11_10/vol11_10_f.PDF (Page consultée le 15 septembre 2008)
- Fauchot, J., Levasseur, M., Roy, S., Gagnon, R. and Weise, A.M. (2005). Environmental factors controlling *Alexandrium tamarens* (Dinophyceae) growth rate during a red tide event in the St. Lawrence Estuary (Canada). *Journal of Phycology*, vol. 41, p. 263-272.
- Fauchot, J., Levasseur, M. and Roy, S. (2005). Daytime and nighttime vertical migrations of *Alexandrium tamarens* in the St. Lawrence estuary (Canada). *Marine Ecology Progress Series*, vol. 296, p. 241-250.
- Fauchot, J., Saucier, F.J., Levasseur, M., Roy, S., and Zakardjian, B. (2008). Wind-driven river plume dynamics and toxic *Alexandrium tamarens* blooms in the St. Lawrence Estuary (Canada): a modeling study. *Harmful Algae*, vol. 7, n° 2, p. 214-227.
- Field, B. et Olewiler, N. (2005). Environmental Economics. 2e edition, McGraw-Hill. ISBN 0-07-092282-9, 498 p.
- Forest Stewardship Council Canada (FSC) (2009). Le Forest Stewardship Council, [En ligne] <http://www.fscCanada.org/francais.htm> (Page consultée le 1^{er} juillet 2009).
- Fortin, P., Sanfaçon, D., Duchesne, R.-M. et Lajoie, F. (2002). Les cinq dernières années d'intervention dans le domaine agricole. Ministère de l'Environnement du Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Groupe d'intervention pour la restauration de la Boyer (GIRB), Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 13, n° 3, p. 5-7. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol13_03/vol13_3_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Gagnon, E. et Gangbazo, G. (2007). Efficacité des bandes riveraines : Analyse de la documentation scientifique et perspectives, Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction des politiques de l'eau, ISBN : 978-2-550-49213-9, 17 p. [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassin_versant/fiches/bandes-riv.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Gagnon, R., Levasseur, M., Weise, A.M., Fauchot, J., Campbell, P.G.C., Weissenboeck, B.J., Merzouk, A., Gosselin, M. and Vigneault, B. (2005). Growth stimulation of

Alexandrium tamarense (dinophyceae) by humic substances from the Manicouagan River (eastern Canada). *J. Phycol.*, vol. 41, n° 3, p. 489-497.

- Gagnon, R.R. (2002). Le Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier, Bilan quinquennal 1995-2000. In Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF). ISBN : 2-550-38858-5, 16 p. [En ligne]. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/amenagement/PMVRMF-Bilan-quinquennal.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Gangbazzo, G. (2006). Guide pour l'élaboration d'un plan directeur de l'eau : sommaire. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), Direction des politiques de l'eau, 12 p., ISBN 2-550-47821-5. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/fiches.htm> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Gouvernement du Canada et Gouvernement du Québec (GC et GQ) (2005). Bilan 1998-2003 - Programme Interactions communautaires, Saint-Laurent Vision 2000, [En ligne]. http://www.slv2000.qc.ca/plan_action/phase3/implication_communautaire/programme_interactions/bilan_98_03/programme_f.htm (Page consultée le 15 mai 2010).
- Guerrier, P. et Paul, M. (2000). Guide d'intervention en cas de déversement en milieu fluvial pour les directions régionales de santé publique du Québec. Saint-Laurent Vision 2000, 49 p. [En ligne]. http://slv2000.qc.ca/bibliotheque/centre_docum/phase3/guide_deversement/accueil_f.htm (Page consultée le 15 mai 2010).
- Hamel, D. (2007). Répartition spatiale et caractérisation génétique du dinoflagellé toxique *Alexandrium tamarense* dans le système marin du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise en océanographie, Université du Québec à Rimouski (UQAR), Rimouski, Québec.
- Hazel, F., Dorion, D., Morisset, J. et Pereira, S. (2006). La gestion intégrée de la zone côtière au Québec : un regard sur 10 ans de pratique. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 7, n° 3. [En ligne]. <http://vertigo.revues.org/2505> (Page consultée le 26 mai 2010).
- Hébert, S. (2002). Évaluation de la qualité bactériologique de sites potentiels de baignade dans le Saint-Laurent, été 2001. Direction du suivi de l'état de l'environnement, Ministère de l'Environnement du Québec, Saint-Laurent Vision 2000, ISBN : 2-550-39452-6, 9 p. [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/baignade/sommaire2001.htm (Page consultée le 15 mai 2010).
- Hébert, S. (2003). Qualité des eaux du fleuve Saint-Laurent, 1990 à 1997 - Sommaire. Ministère de l'Environnement du Québec, Saint-Laurent Vision 2000. [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/fleuve/index.htm (Page consultée le 15 mai 2010).
- Hébert, S. (2006). La qualité de l'eau du secteur fluvial - Paramètres physico-chimiques et bactériologiques, 2e édition. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Plan Saint-Laurent, ISBN 2-550-48771-0, 4 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/sl_obs/sesl/publications/fiches_indicateurs/qualite_eau_parametre_2006_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Hébert, S. (2006). La salubrité des sites potentiels de baignade en eau douce, 2e édition. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec,

- Plan Saint-Laurent, ISBN 2-550-48772-9, 4 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.gc.ca/sl_obs/sesl/publications/fiches_indicateurs/salubrite_baignade_2006_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Hudon, M., Mingelbier, M. et Morin, J. (2000). Conséquences des fluctuations du niveau d'eau dans l'écosystème du Saint-Laurent. Centre Saint-Laurent, Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Société de la faune et des parcs du Québec, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n° 4, p. 1-3. [En ligne]. http://www.planstlaurent.gc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol11_04/vol11_4_f.PDF (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ichimi, K., Yamasaki, M., Okumura, Y. and Suzuki, T. (2001). The growth and cyst formation of a toxic dinoflagellate, *Alexandrium tamarense*, at low water temperatures in northeastern Japan. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 261, n° 1, p. 17-29.
- Institut de la statistique du Québec (2009). Le Québec chiffres en main, édition 2009. ISBN 978-2-551-23786-9, 60 p. [En ligne]. http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/referenc/pdf2009/QCM2009_fr.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER) (2010). [En ligne]. <http://www.ifremer.fr/francais/index.php> (Page consultée le 25 mai 2010).
- Institut Maurice-Lamontagne (IML) (1999). Le Saint-Laurent marin - Connaissances et interventions environnementales : 1993-1998. Pêches et Océans Canada, Saint-Laurent Vision 2000, 70 p.
- Jourdain, A. et Fortin, C. (2000). La tournée régionale des comités Zone d'intervention prioritaire, pour mieux soutenir l'action locale et régionale. Centre Saint-Laurent, Environnement Canada, Société de la faune et des parcs du Québec, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n° 7, p. 1-3. [En ligne]. http://www.planstlaurent.gc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol11_07/vol11_7_f.PDF (Page consultée le 23 mai 2010).
- Kim, H.G. (2006). Mitigation and Controls of HABs. Ecology of Harmful Algae, *Ecological Studies*, vol. 189, p.327-338.
- Kim, H.G. (2010). An Overview on the Occurrences of Harmful Algal Blooms (HABs) and Mitigation Strategies in Korean Coastal Waters. Coastal Environmental and Ecosystem Issues of the East China Sea, Department of Oceanography, Pukyong National University, Republic of Korea, p.121-131. [En ligne]. <http://www.terrapub.co.jp/onlineproceedings/fs/nu/pdf/nu2010121.pdf> (Page consultée le 23 mai 2010).
- Lachance, C. et Saint-Jacques, Y. (1995). Des gens motivés, des gens d'action. Centre Saint-Laurent, Environnement Canada, Comité ZIP du Haut-Saint-Laurent, Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 5, n° 2, p. 2-3. [En ligne]. http://www.planstlaurent.gc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol05_02/vol5_2_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Lalancette, J. et coll. (2001). Portrait des activités de dragage sur le Saint-Laurent. Les aspects opérationnels et environnementaux. Rapport préliminaire. Ministère des Transports du Québec. 55 p.
- Lapalme R. (2006). Protéger et restaurer les lacs. Bertrand Dumont éditeur, Bouquins verts, ISBN 2-923382-07-2, 192 p.

- Laroche, R. (2005). Aménagement d'une bande de protection riveraine en bordure des cours d'eau, [En ligne]. http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Fiche_aménagement_bandes_protection_riveraine.pdf (Page consultée le 28 février 2009).
- Laurion, I. and Roy S. (2009). Growth and photoprotection in three dinoflagellates (including two strains of *Alexandrium tamarense*) and one diatom exposed to four weeks of natural and enhanced UVB radiation. *Journal of Phycology*, vol. 45, n° 1, p. 16-33.
- Leandro, L.F., Teegarden, G. J., Roth, P.B., Wang, Z. and Doucette, G.J. (2010). The copepod *Calanus finmarchicus*: A potential vector for trophic transfer of the marine algal biotoxin, domoic acid. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 382, n° 2, p. 88-95.
- Chee Yew Leong, S. and Taguchi, S. (2004). Response of the dinoflagellate *Alexandrium tamarense* to a range of nitrogen sources and concentrations: growth rate, chemical carbon and nitrogen, and pigments. *Hydrobiologia*, vol. 515, n° 1-3, p. 215-224.
- Legg, W. et Viatte, G. (s.d.). Quels systèmes de production pour une agriculture durable? In Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Pêcheries de l'OCDE, [En ligne]. http://www.observeurocde.org/news/fullstory.php/aid/225/Quels_syst_E8mes_de_production_pour_une_agriculture_durable_.html (Page consultée le 15 mai 2010).
- Loi sur la qualité de l'environnement*, L.R.Q., c. Q-2.
- Loi sur le développement durable*, L.R.Q., c. D-8.1.1
- Loi sur les compétences municipales*, L.R.Q., c. C-47.
- Loi sur les espèces menacées ou vulnérables*, L.R.Q., c. E-12.01.
- Longhi, M.L., Roy, S., Ferreyra G. and Schloss, I. (2006). Variable phytoplankton response to enhanced UV-B and nitrate addition in mesocosm experiments at three latitudes (Canada, Brazil and Argentina), *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, vol. 313, p.57-72.
- Ménèsguen, A. (2003). Les "marées vertes" en Bretagne, la responsabilité du nitrate. IFREMER/Centre de Brest, Direction de l'Environnement et de l'Aménagement du Littoral, Département d'Écologie Côtière, Plouzané, 11 p.
- Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) (2003). Synthèse des informations environnementales disponibles en matière agricole au Québec. Direction des politiques du secteur agricole, Québec, Envirodoq ENV/2003/0025, 143 pages. [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/synthese-info/synthese-info-enviro-agricole.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère de l'Environnement du Québec et Environnement Canada (MEQ et EC) (2000). Portrait de la biodiversité du Saint-Laurent. Saint-Laurent Vision 2000. [En ligne]. http://www.qc.ec.qc.ca/faune/biodiv/fr/table_mat.html (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère de l'Environnement du Québec et Environnement Canada (MEQ et EC) (2001). Évaluation du potentiel toxique des effluents des stations d'épuration municipales du Québec. Saint-Laurent Vision 2000, ISBN 0-662-85623-6, 178 p. [En ligne].

- http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/diverses/effluents_rapport/effluents_rapport_f.PDF (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère de l'Agriculture et de l'Aquaculture du Nouveau-Brunswick (MAANB) (s.d.). Pratiques culturelles de conservation, [En ligne]. <http://www.gnb.ca/0173/30/0173300002-f.asp> (Page consultée le 12 mars 2009).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2005). Bonnes pratiques agroenvironnementales pour votre entreprise agricole. 2e édition. *In* Production animale et végétale. Bonnes pratiques. ISBN 2-550-43152-9, 43 p. [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/BonnesPratiques2005.pdf> (Page consultée le 22 janvier 2009).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2005). L'accompagnement agroenvironnemental: Des solutions à votre portée, ISBN 2-550-42816-1, 2 p. [En ligne]. <http://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/01/MONO/2005/03/802145.pdf> (Page consultée le 20 mars 2009).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2008). Prime-Vert. Gouvernement du Québec, ISBN 978-2-550-55431-8, 37 p. [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/32F6530C-9A4F-4CA7-8ECC-3CF48AFEB875/0/PrimeVert.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2010). Profil statistique par bassin versant. [En ligne] <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Regions> (Page consultée le 16 mai 2010).
- Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec (MAMROT) (2007). Pacte rural, [En ligne]. http://www.mamrot.gouv.qc.ca/publications/regions/general/pacte_rural.pdf (Page consultée le 18 mars 2009).
- Ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) (2009). Monitoring de la marée rouge. *In* Science et Recherche, La dynamique du plancton, Phytoplancton. [En ligne]. <http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/science/oceans/plankton-plancton/plankton-plancton-fra.htm> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) (2003). La gestion intégrée à la portée de tous : démarche méthodologique pour les collectivités côtières du Saint-Laurent marin. Québec, 61 p.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) (2010). [En ligne]. www.mrnf.gouv.qc.ca (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère des Transports du Québec (MTQ) (1997). Annexe D, Méthode du tiers inférieur pour l'entretien des fossés, Fiche de promotion environnementale FPE-01 et norme 1401, [En ligne] http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/sherbrooke-410/documents/PR5-1_annD.pdf (Page consultée le 25 juin 2009).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2002). La politique nationale de l'eau. ISBN 2-550-40074-7, 103 p. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/politique/politique-integral.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2007). Analyse comparative de systèmes d'indicateurs de développement durable. ISBN

- 978-2-550-49880-3, 42 p. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/developpement/indicateurs/analyscomp.pdf> (Page consultée le 5 septembre 2008)
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (s.d.). Les fleurs d'eau d'algues bleu-vert en 2008, Une gestion efficace avec les partenaires du milieu. Bilan final des plans d'eau touchés par une fleur d'eau d'algues bleu-vert en 2008. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/algues-bv/bilan/saison2008/Bilan2008.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (s.d.). Les fleurs d'eau d'algues bleu-vert en 2009, Une responsabilité collective. Bilan final des plans d'eau touchés par une fleur d'eau d'algues bleu-vert en 2009. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/algues-bv/bilan/saison2009/Bilan2009.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2010). Qualité de l'eau, [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/inter.htm> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Moore, S.K., Mantua, N.J., Hickey, B.M. and Trainer, V.L. (2009). Recent trends in paralytic shellfish toxins in Puget Sound, relationships to climate, and capacity for prediction of toxic events. *Harmful Algae*, vol. 8, n° 3, p. 463-477.
- Morisset, J. (1999). Dans l'estuaire maritime - La gestion intégrée de la zone côtière. Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 10, n° 5, p. 1-3. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol10_05/vol10_5_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Murua, J.R. et Laajimi, A. (1995). Transition de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture durable : quelques réflexions. In Centre International de Hautes Études Agronomiques Méditerranéennes (CIHEAM). Publications [En ligne]. <http://www.ciheam.org/> (Page consultée le 15 mars 2009).
- Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL) (2009). Phytoplancton toxique. Relevés annuels de l'abondance des espèces phytoplanctoniques et des paramètres physico-chimiques de l'eau. [En ligne]. <http://ogsl.ca/fr/phytoplancton.html> (Page consultée le 15 juin 2010).
- Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) (2010). Environnement. [En ligne]. www.oecd.org/env/ (Page consultée le 15 mai 2010).
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (ONUAA) (2003). Élaboration d'un cadre de bonnes pratiques agricoles. In Comité de l'agriculture, dix-septième session, Rome, 31 mars – 4 avril 2003. [En ligne]. <http://www.fao.org/DOCREP/MEETING/006/Y8704f.HTM> (Page consultée le 22 février 2009).
- Painchaud, J. (1999). La production porcine et la culture du maïs - Répercussions potentielles sur la qualité de l'eau. Ministère de l'Environnement du Québec, Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 10, n° 1, p. 4-6. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol10_01/vol10_1_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Parc marin du Saguenay-Saint-Laurent (PMSSL) (2010). [En ligne]. http://www.parcmarin.qc.ca/1508_fr.html (Page consultée le 25 mai 2010).

- Pearce, F. (2006). Quand meurent les grands fleuves. Enquête sur la crise mondiale de l'eau. Calmann-Lévy, 435 p.
- Pêches et Océans Canada, Environnement Canada, North Fraser Port Authority, Fraser Port Authority et Ministère de la Protection de l'eau, des terres et de l'air de la C.-B. (MPO *et al.*) (2002). Shoreline Structures Environmental Design – A Guide for Structures along Estuaries and Large Rivers. ISBN 0-662-33045-5, 142 p. [En ligne]. <http://www.greenshores.ca/sites/greenshores/documents/media/108.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Prakash, A., Rashid, M. A., Jensen, A. and Subba, Rao, D. V. (1973). Influence of humic substances on the growth of marine phytoplankton: diatoms. *Limnol. Oceanogr.* vol. 18, p.516–24.
- Pillai, M. (2008). Advantages and disadvantages of intensive farming. In Buzzle.com. Articles, [En ligne]. <http://www.buzzle.com/articles/advantages-and-disadvantages-for-intensive-farming.html> (Page consultée le 15 mars 2009).
- Plan St-Laurent (PSL) (2008). Les processus océanographiques dans l'estuaire et le golfe, 2e éd.. Comité Programme de monitoring de la zone atlantique, Pêches et Océans Canada, Institut Maurice-Lamontagne, ISBN 978-1-100-90300-2, 8 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/sl_obs/sesl/publications/fiches_indicateurs/Oceano2008_f_Final.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Plan Saint-Laurent (PSL) (2008). Programme zones d'intervention prioritaire (ZIP). [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/sl_bm/collectivites/zip/accueil_f.html (Page consultée le 15 mai 2010).
- Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables*, c. Q-2, r. 17.3.
- Programme des Nations-Unies pour l'environnement (PNUE) (2007). Rapport GEO-4. ISBN: 978-92-807-2837-8. [En ligne]. http://www.unep.org/geo/geo4/report/GEO-4_Report_Full_FR.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Province de la Colombie-Britannique (CB) (2003). Coastal Shore Stewardship: A Guide for Planners, Builders and Developers on Canada's Pacific Coast. ISBN 0-7726-5079-9, 94 p. [En ligne]. www.stewardshipcentre.bc.ca/sc_bc/stew_series/bc_stew_series.asp#grass (Page consultée le 15 mai 2010).
- Québec (2009a). Semis direct et environnement : La certification terre vivante est maintenant lancée. In Gouvernement du Québec, [En ligne]. <http://communiqués.gouv.qc.ca/gouvqc/communiqués/GPQF/Aout2008/08/c2755.html?slang=en> (Page consultée le 8 mars 2008)
- Racine, R. (2001). Mesures et ouvrages de protection pour l'entretien et l'aménagement des cours d'eau en milieu agricole. Notions d'aménagement et pratiques agricoles visant à assurer la pérennité des cours d'eau. Urgel Delisle et associés inc. 19 p. [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Mesures.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Règlement sur les carrières et sablières*, R.R.Q., c. Q-2, r.2.
- Règlement sur les exploitations agricoles*, c. Q-2, r. 11.1.
- Regroupement des Associations Pour la Protection de l'Environnement des Lacs et cours d'eau de l'Estrie et du haut bassin de la Saint-François (RAPPEL) (2005). Fiche technique, Des comportements pour un lac en santé (Pour les forestiers et les

- agriculteurs). In RAPPEL, [En ligne] [http://www.rappel.qc.ca/IMG/pdf/Fiche technique 14 - forestiers et agriculteurs.pdf](http://www.rappel.qc.ca/IMG/pdf/Fiche_technique_14_forestiers_etagriculteurs.pdf) (Page consultée le 20 juin 2009).
- Regroupement des Associations Pour la Protection de l'Environnement des Lacs et cours d'eau de l'Estrie et du haut bassin de la Saint-François (RAPPEL) (2005). Fiche technique, Des comportements pour un lac en santé (Pour les riverains). In RAPPEL, [En ligne] [http://www.rappel.qc.ca/IMG/pdf/Fiche technique 13 - riverains.pdf](http://www.rappel.qc.ca/IMG/pdf/Fiche_technique_13_riverains.pdf) (Page consultée le 20 juin 2009).
- Regroupement des Associations Pour la Protection de l'Environnement des Lacs et cours d'eau de l'Estrie et du haut bassin de la Saint-François (RAPPEL) (2005). Fiche technique, le phosphore : un engrais trop efficace!. In RAPPEL, [En ligne] [http://www.rappel.qc.ca/IMG/pdf/Fiche technique 3 - phosphore.pdf](http://www.rappel.qc.ca/IMG/pdf/Fiche_technique_3_phosphore.pdf) (Page consultée le 1^{er} juin 2009).
- Regroupement des Associations Pour la Protection de l'Environnement des Lacs et cours d'eau de l'Estrie et du haut bassin de la Saint-François (RAPPEL) (2005). Fiche technique, Pour une gestion globale et collective de notre eau ! In RAPPEL, [En ligne] [http://www.rappel.qc.ca/IMG/pdf/Fiche technique 16 - gestion globale.pdf](http://www.rappel.qc.ca/IMG/pdf/Fiche_technique_16_gestion_globale.pdf) (Page consultée le 20 juin 2009).
- Richardson, K. (1997). Harmful or Exceptional Phytoplankton Blooms in the Marine Ecosystem. *Advances in Marine Biology*, vol. 31, p. 301-385.
- Rondeau, B., Cossa, D., Gagnon, P. *et al.* (2000). Budget and Sources of Suspended Sediment Transported in the St. Lawrence River. Saint-Laurent Vision 2000, *Hydrological Processes*, vol.14, p. 21-36.
- Roy, N. et Ellefsen, H.F. (2002). Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire - Un colloque en préparation dans la région de l'estuaire maritime. Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire, Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 12, n° 8, p. 1-3. [En ligne]. [http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol12_08/vol12_8 f.PDF](http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol12_08/vol12_8_f.PDF) (Page consultée le 15 mai 2010).
- Ryding, S.O. et Rast, W. (1994). Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs, Éditions Masson, 300 p.
- Saint-Laurent Vision 2000 (SLV2000) (1997). La pollution diffuse agricole, l'urgence d'une approche globale. Saint-Laurent Vision 2000, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 7, n° 2, p. 7-8. [En ligne]. [http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol07_02/vol7_2 f.pdf](http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol07_02/vol7_2_f.pdf) (Page consultée le 15 mai 2010).
- Saint-Laurent Vision 2000 (SLV2000) (1997). Quelles approches de gestion privilégier pour les prochaines années ?, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 7, n° 2, p. 10-11. [En ligne]. [http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol07_02/vol7_2 f.pdf](http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol07_02/vol7_2_f.pdf) (Page consultée le 15 mai 2010).
- Saint-Laurent Vision 2000 (SLV2000) (1998). Implication communautaire - Soutenir l'action des communautés. *Bulletin Le Fleuve*, vol. 9, n° 1, p. 5. [En ligne]. [http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol09_01/vol9_1 f.pdf](http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/vol09_01/vol9_1_f.pdf) (Page consultée le 15 mai 2010).
- Saint-Laurent Vision 2000 (SLV2000) (2002). Rapport annuel 2000-2001, 52 p., ISBN 0-662-86473-5. [En ligne]. [http://www.slv2000.qc.ca/bibliotheque/centre docum/phase3/rap annuel_2000_01/2000-01 Rap annuel f.pdf](http://www.slv2000.qc.ca/bibliotheque/centre_docum/phase3/rap_annuel_2000_01/2000-01_Rap_annuel_f.pdf) (Page consultée le 5 mai 2010)

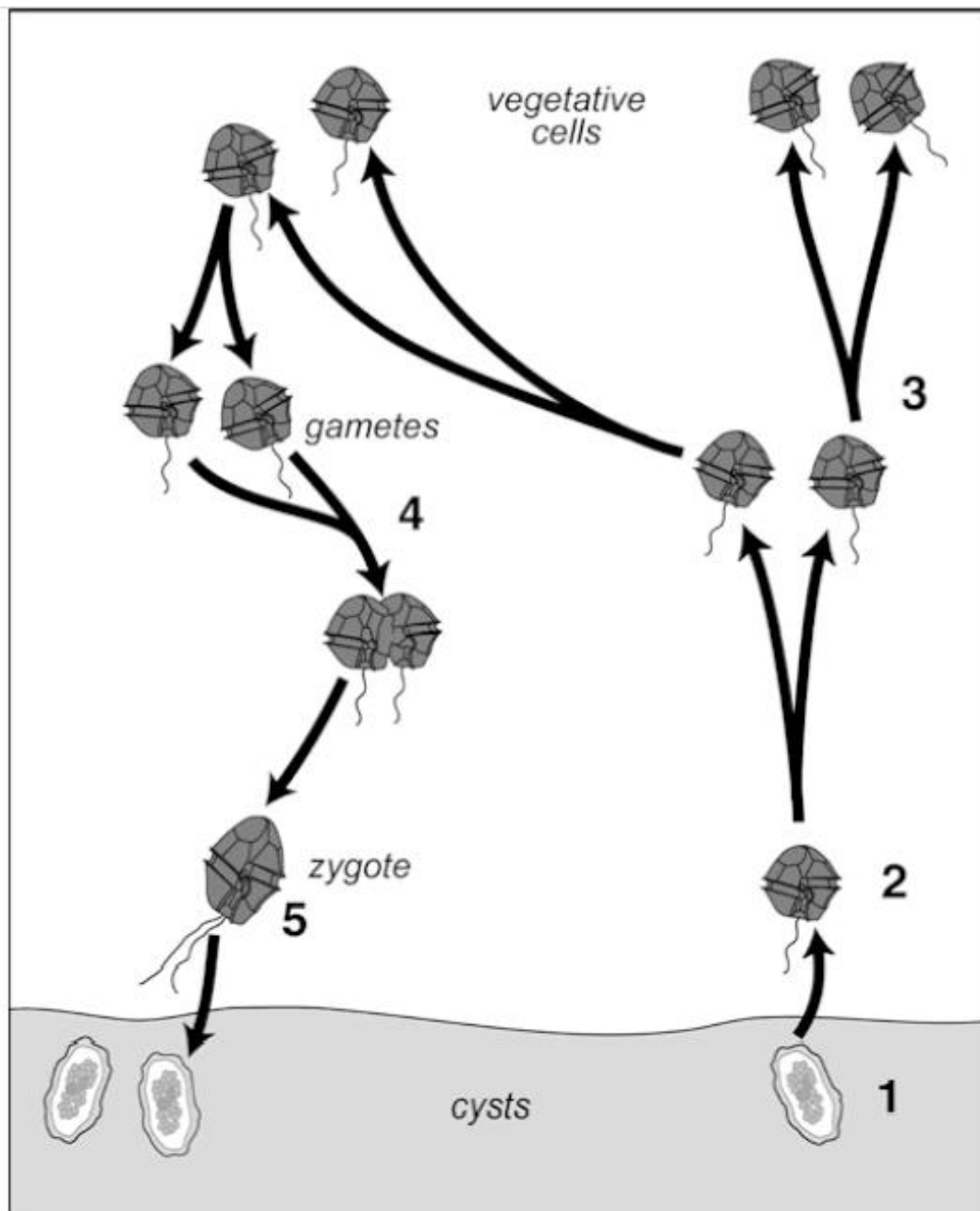
- Saulnier, I., Bouchard, H. et Tapin, L. (2007). Rendez-vous Saint-Laurent 2006 - Un bilan partiel encourageant. Plan Saint-Laurent, Environnement Canada, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/sl_obs/sesl/divers/RDVSL2006/bilan_f.html (Page consultée le 15 mai 2010).
- Sauvé, G., Levasseur, M. et Bates, S. (2000). Évaluation des biotoxines marines nouvellement identifiées dans des mollusques québécois et identification de leurs sources. Agence canadienne d'inspection des aliments, 41 p.
- Savage, C. et Jean, M. (2008). Espèces végétales envahissantes des milieux humides du Saint-Laurent. Environnement Canada, ISBN 978-0-662-04765-0, 8 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/sl_obs/sesl/publications/fiches_indicateurs/plantes_envahi_2008_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Shi, Y., Hu, H. and Cong, W. (2005). Positive effects of continuous low nitrate levels on growth and photosynthesis of *Alexandrium tamarense* (Gonyaulacales, Dinophyceae). *Phycological Research*, vol. 53, n° 1, p. 43-48.
- Société de conservation des milieux humides du Québec (SCMHQ) (2001). Le long du Saint-Laurent, de nouvelles ententes pour la protection des terres humides. Société de conservation des milieux humides du Québec, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n° 8, p. 1.
- Statistique Canada (2003). L'activité humaine et l'environnement. Statistiques annuelles 2003. ISSN 1703-5805, 98 p. [En ligne]. <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/16-201-x2003000-fra.pdf> (Page consultée le 15 octobre 2010).
- Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE) (2007). D'ici à 2050 : la transition du Canada vers un avenir à faible taux d'émission : conseils sur la réduction à long terme des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques. Gouvernement du Canada, 98 p., ISBN 978-1-894737-14-2. [En ligne]. <http://www.nrtee-trnee.com/fra/publications/d-ici-2050/Getting-to-2050-low-res-fra.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Talbot, A. (2006). Enjeux de la disponibilité de l'eau pour le fleuve Saint-Laurent – Synthèse environnementale. Environnement Canada, Montréal, ISBN 0-662-72818-1, 215 p.
- Teegarden, G. J. and Cembella, A.D. (1996). Grazing of toxic dinoflagellates, *Alexandrium* spp., by adult copepods of coastal Maine: Implications for the fate of paralytic shellfish toxins in marine food webs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 196, no 1-2, p. 145-176.
- Toffoli, R. (2009). Activités de sensibilisations actuelles faites auprès des agriculteurs par le MAPAQ. Communication orale. Entrevue menée par Sophie Paré et Abdulkarim Hassen avec Monsieur Roberto Toffoli, Conseiller en environnement pour le MAPAQ, 29 juin 2009, bureau de la Direction régionale de l'Estrie, Sherbrooke.
- United States Environment Protection Agency (EPA) (2010). [En ligne]. www.epa.gov (Page consultée le 15 mai 2010).
- Valentin, A. et Cartier, J.-F. (2001). Pour une meilleure détection des micro-organismes pathogènes dans les mollusques bivalves de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Institut des sciences de la mer, Université du Québec à Rimouski, Régie régionale de la santé et des services sociaux de la Côte-Nord, *Bulletin Le Fleuve*, vol. 11, n°

- 9, p. 4-5. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/centre_ref/publications/lefleuve/ol11_09/vol11_9_f.PDF (Page consultée le 15 mai 2010).
- Vigor, John (s.d.). Plankton. *In* The Practical Encyclopedia of Boating: An A-Z compendium of seamanship, boat maintenance, navigation, and nautical wisdom. [En ligne]. <http://www.answers.com/topic/plankton> (Page consultée le 25 octobre 2010).
- Ville de Magog (s.d.a).Guide explicatif pour les riverains, Nouvelles dispositions du Règlement sur la protection des berges [En ligne] <http://www.ville.magog.qc.ca/documents/Depliantreglementprotectionberges.pdf> (Page consultée le 25 juin 2009).
- Ville de Magog (s.d.b).Guide explicatif pour les citoyens, Nouvelles dispositions du Règlement sur l'utilisation des engrais et des pesticides [En ligne] <http://www.ville.magog.qc.ca/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/GuideExplicatifReglementEngraisPesticides.pdf> (Page consultée le 25 juin 2009).
- Ville de Magog (s.d.c).Guide explicatif, Contrôle de l'érosion [En ligne] <http://www.ville.magog.qc.ca/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/GuideExplicatifErosionAvril%202010.pdf> (Page consultée le 25 juin 2009).
- Villeneuve, S. et Painchaud, J. (2003). Portrait global de l'état du Saint-Laurent. Direction de la conservation de l'environnement, Environnement Canada, Ministère de l'Environnement du Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 0-662-88345-4, 18 p. [En ligne]. http://www.planstlaurent.qc.ca/sl_obs/sesl/publications/portrait/2004/Portrait_global_f.pdf (Page consultée le 15 mai 2010).
- Villeneuve, S. et Quilliam, L. (2000). Les risques et les conséquences environnementales de la navigation sur le Saint-Laurent. Rapport ST-188. Conservation de l'environnement, Environnement Canada, Saint-Laurent Vision 2000, ISBN 0-662-85046-7, 159 p.
- Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) (2010). Harmful Algae and Red Tides Web Page. ([En ligne]. <http://www.whoi.edu/page.do?pid=11913> (Page consultée le 20 mai 2010).

ANNEXE 2

CYCLE DE VIE D'ALEXANDRIUM SP.

Tiré de Sellner *et al.*, 2003.



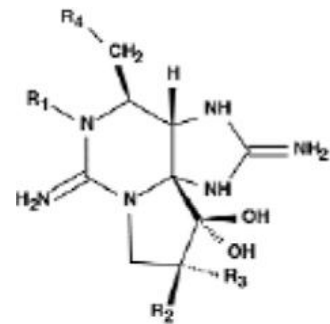
ANNEXE 3

MARÉE ROUGE DE 2008

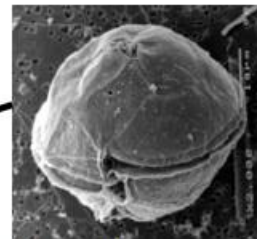
Modifié de Dufour *et al.*, 2009 et Van Dolah, 2000.



Photo : Michel Starr, Maurice Lamontagne Institute



Forme moléculaire
de la saxitoxine



Alexandrium tamarense

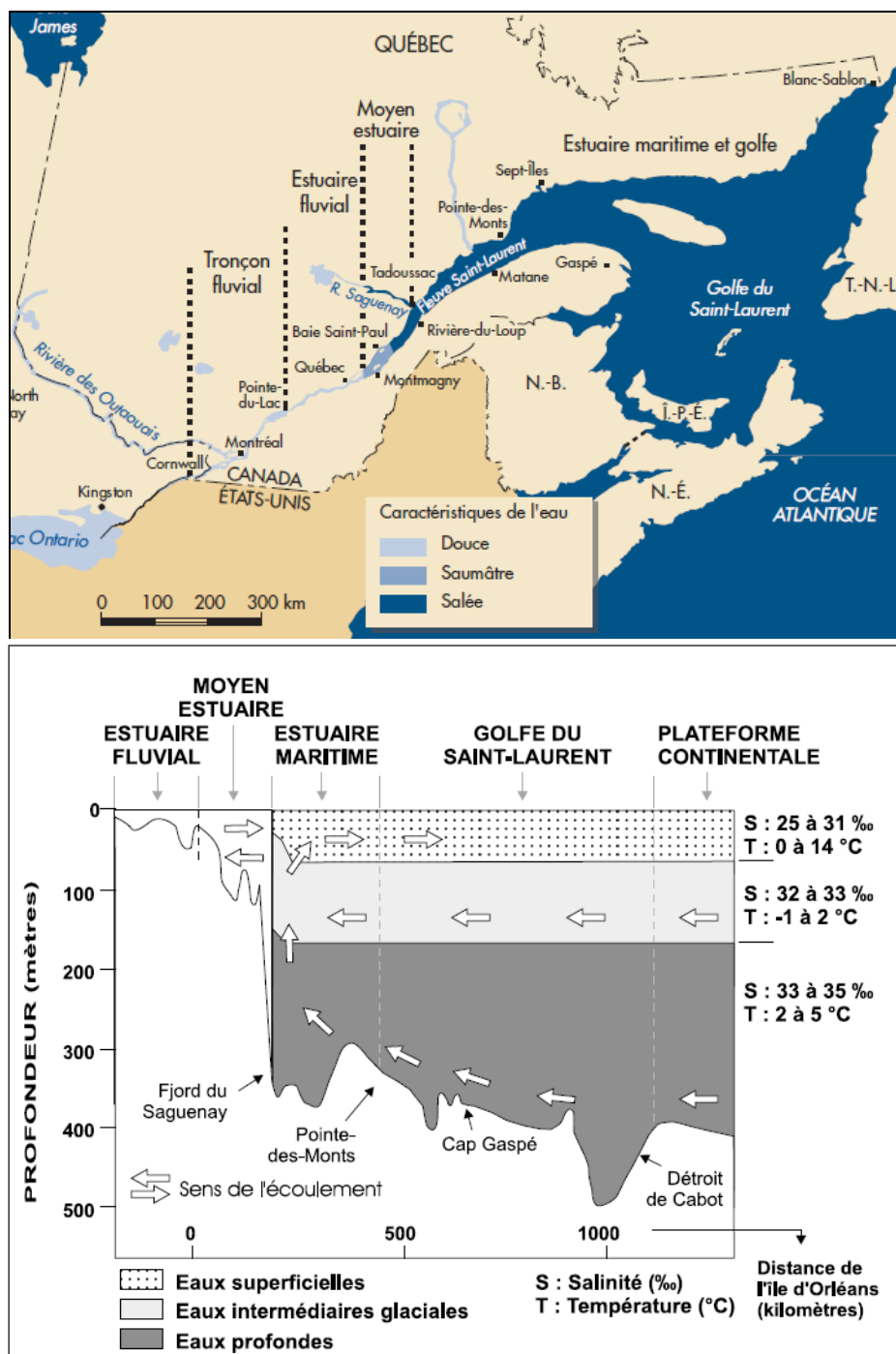
Carcasses trouvées sur les rives



ANNEXE 4

SYSTÈME DU SAINT-LAURENT ET STRATIFICATION ESTIVALE

Modifié de PSL, 2008 et Gagnon, 1996.



ANNEXE 5

BATHYMÉTRIE DE L'ESTUAIRE ET DU GOLFE

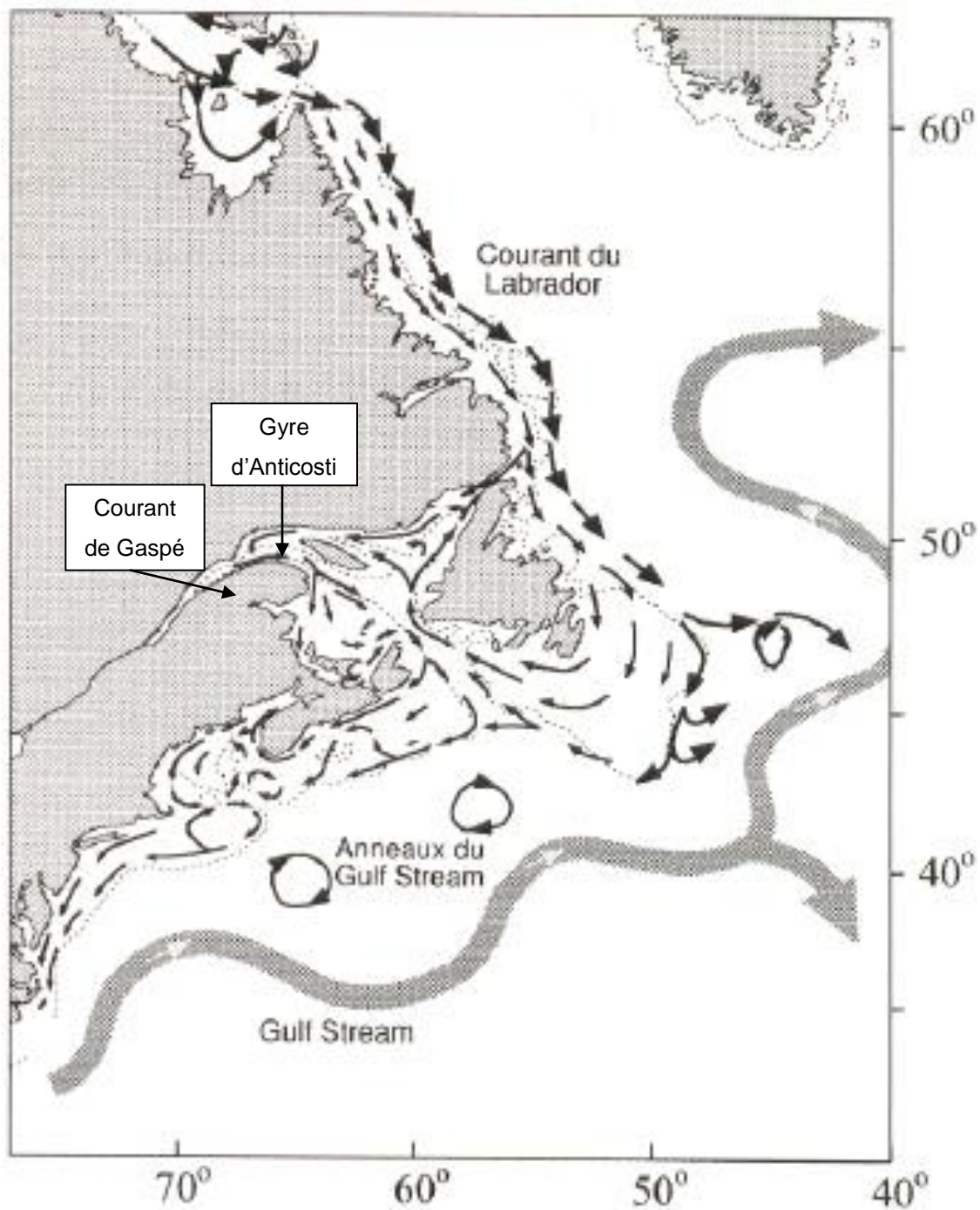
Tiré de MPO, 2005.



ANNEXE 6

COURANTS DE SURFACE DE L'ATLANTIQUE NORD-OUEST

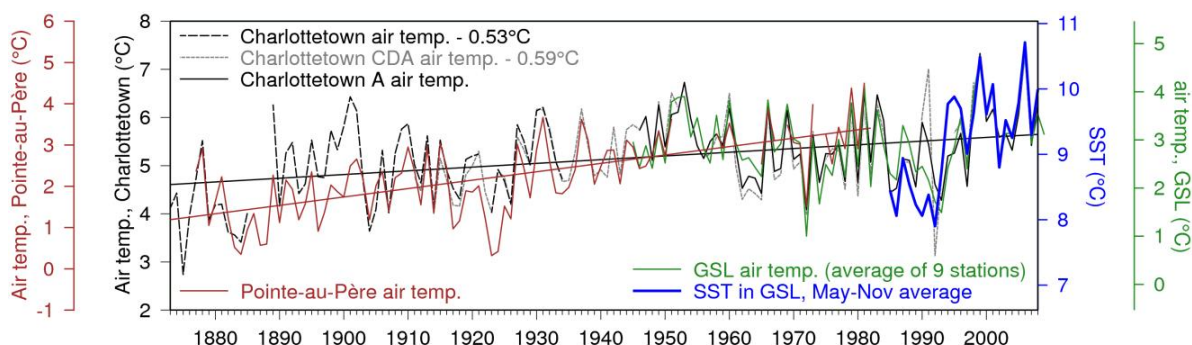
Modifié de MPO, 1996.



ANNEXE 7

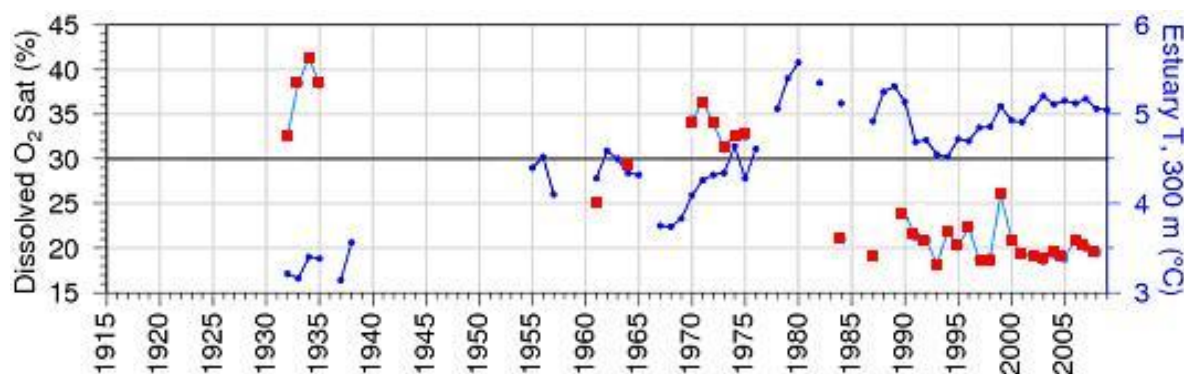
TEMPÉRATURE ET OXYGÈNE DISSOUS

Tiré de Dufour *et al.*, 2009.



Température des eaux de surfaces et de l'air dans le golfe du Saint-Laurent

Les moyennes de température de l'eau de surface (SST) pour le golfe du Saint-Laurent, de mai à novembre, sont disponibles depuis 1985 (ligne bleue) et montrent une tendance de réchauffement à 2 °C entre une période plus froide et une période plus chaude séparées aux environs de 1993. Cette série est bien corrélée avec les données de température moyenne de l'air à neuf stations sélectionnées à travers le Golfe disponibles depuis 1945 (ligne verte), à trois stations de Charlottetown depuis 1873 (lignes grise et noire), et à Pointe-au-Père depuis 1876 (ligne rouge).



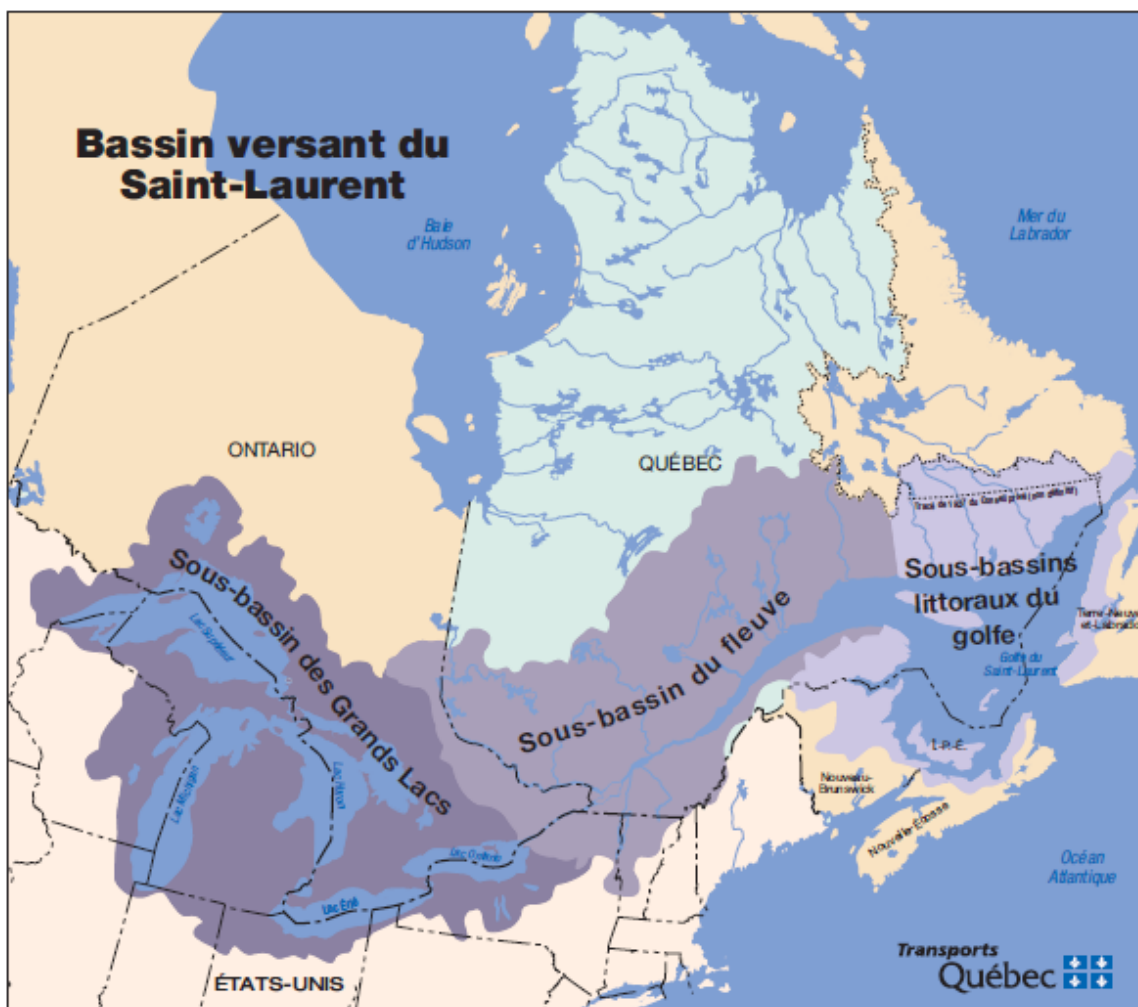
Saturation en oxygène dissous dans les eaux profondes de l'estuaire

La saturation en oxygène dissous (carré rouge) et la température (point bleu) entre 295 m et le fond dans le centre du bassin profond l'estuaire du Saint-Laurent. La ligne horizontale au niveau de 30% de saturation en oxygène marque le seuil des conditions hypoxiques.

ANNEXE 8

BASSIN VERSANT DU SAINT-LAURENT

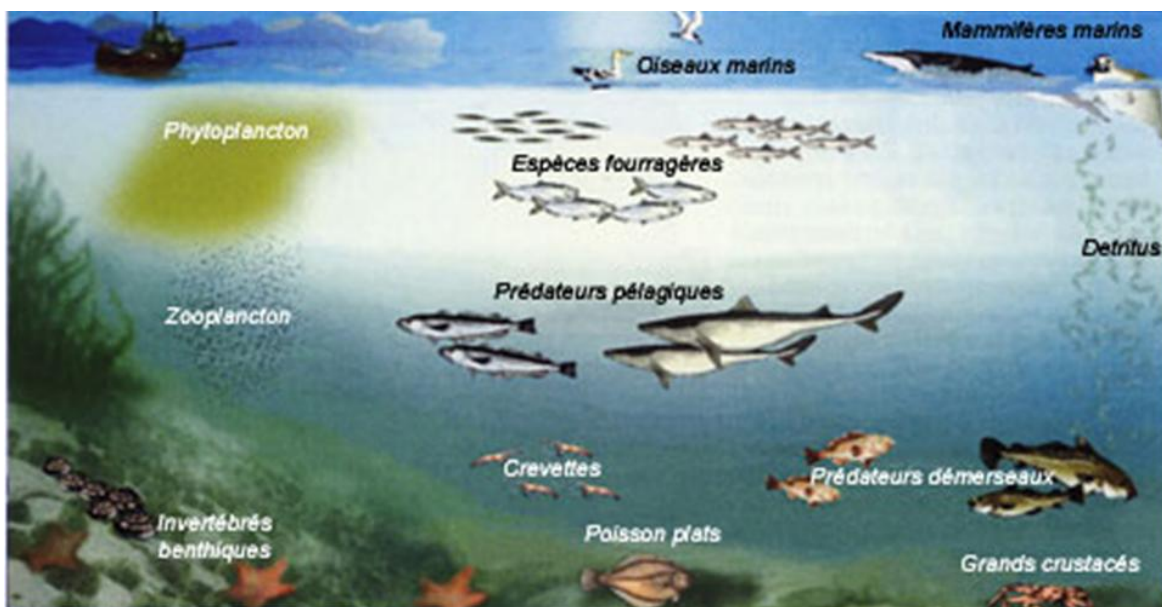
Tiré de SODES, s.d.



ANNEXE 9

ÉCOSYSTÈME DU GOLFE ET VARIATION DES DÉBARQUEMENTS

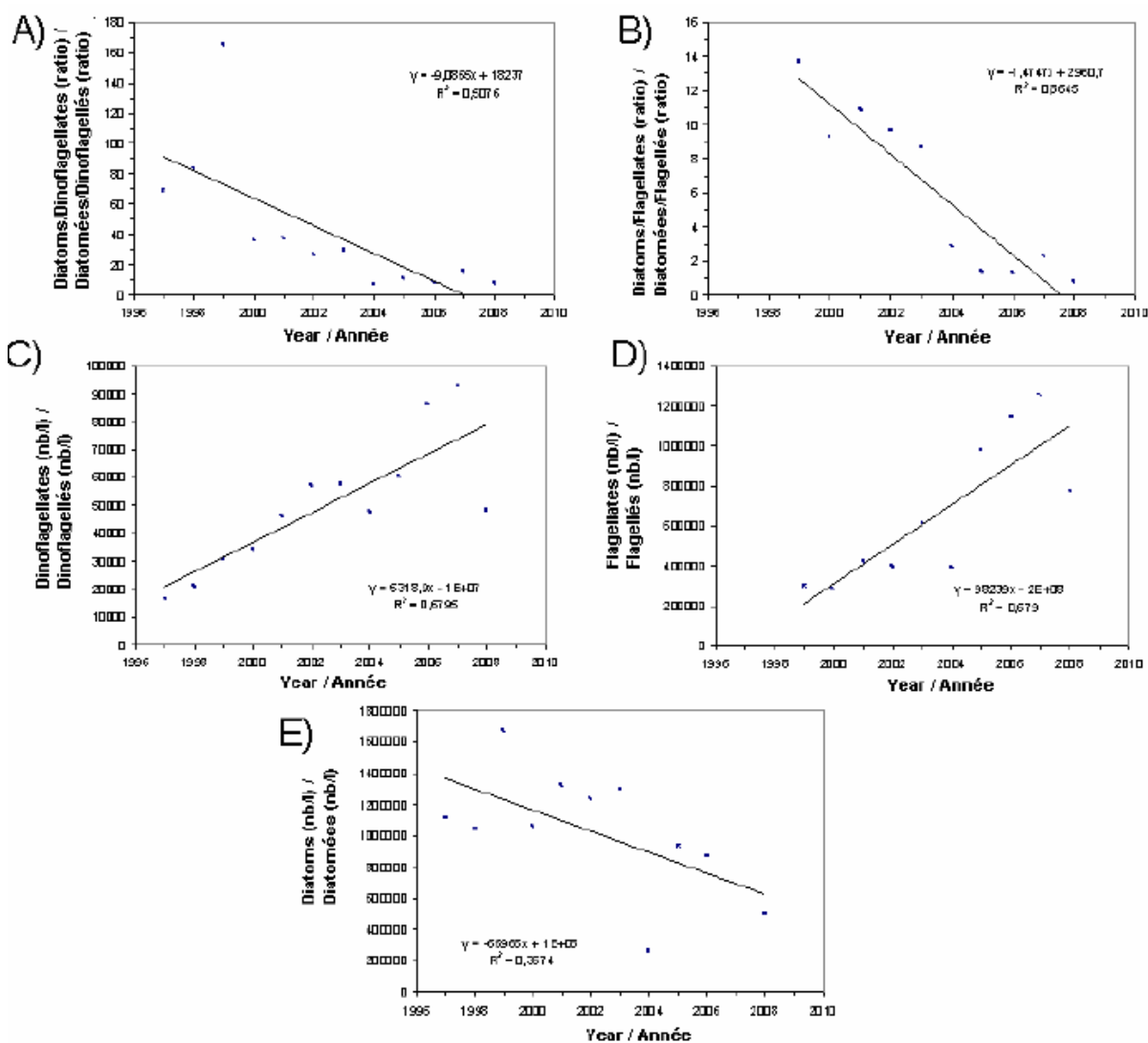
Tiré de MPO, 2005.



Groupe d'espèces	1990-1991		1997-2001	
	Débarquements	Valeur	Débarquements	Valeur
Poisson de fond	38,7%	24,1%	8%	5,1%
Espèces pélagiques	34,5%	8,2%	48%	6,6%
Invertébrés	22,7%	66,6%	41%	88%
Plantes marines	4,1%	1,1%	3%	0,3%

ANNEXE 10 **VARIATION DU PHYTOPLANKTON DANS L'ESTUAIRE**

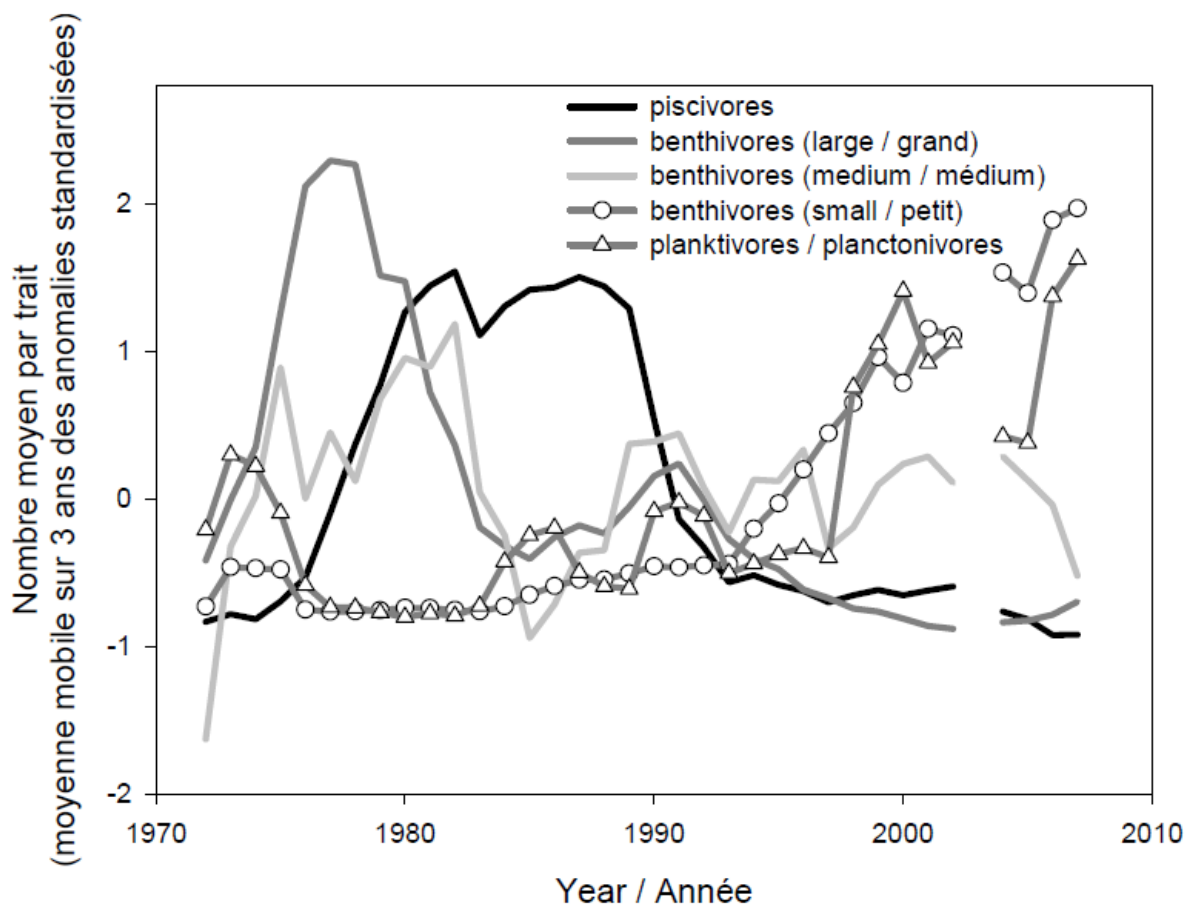
Tiré de Dufour *et al.*, 2009.



ANNEXE 11

GROUPES TROPHIQUES DES POISSONS DE FOND

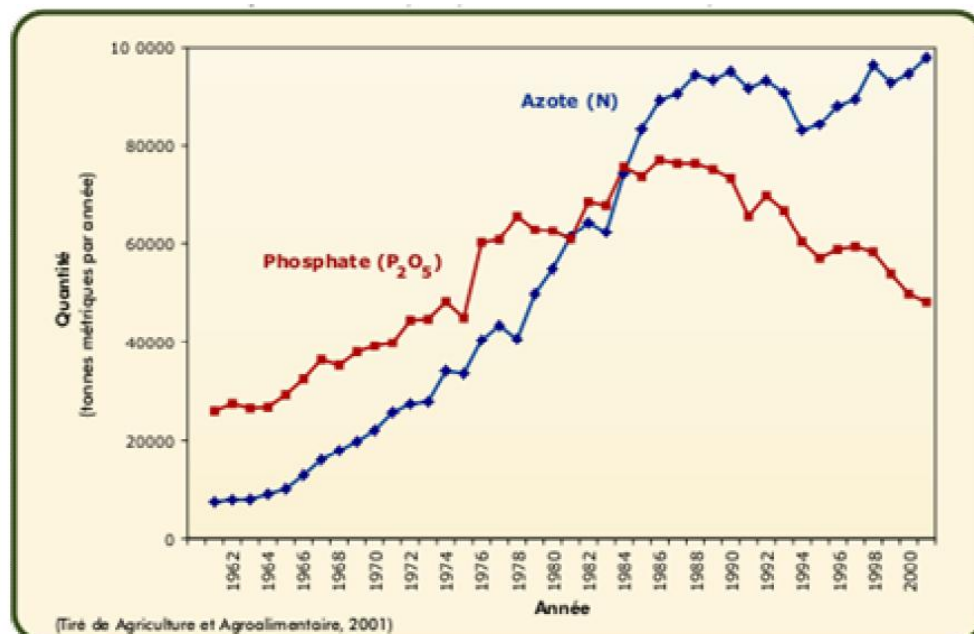
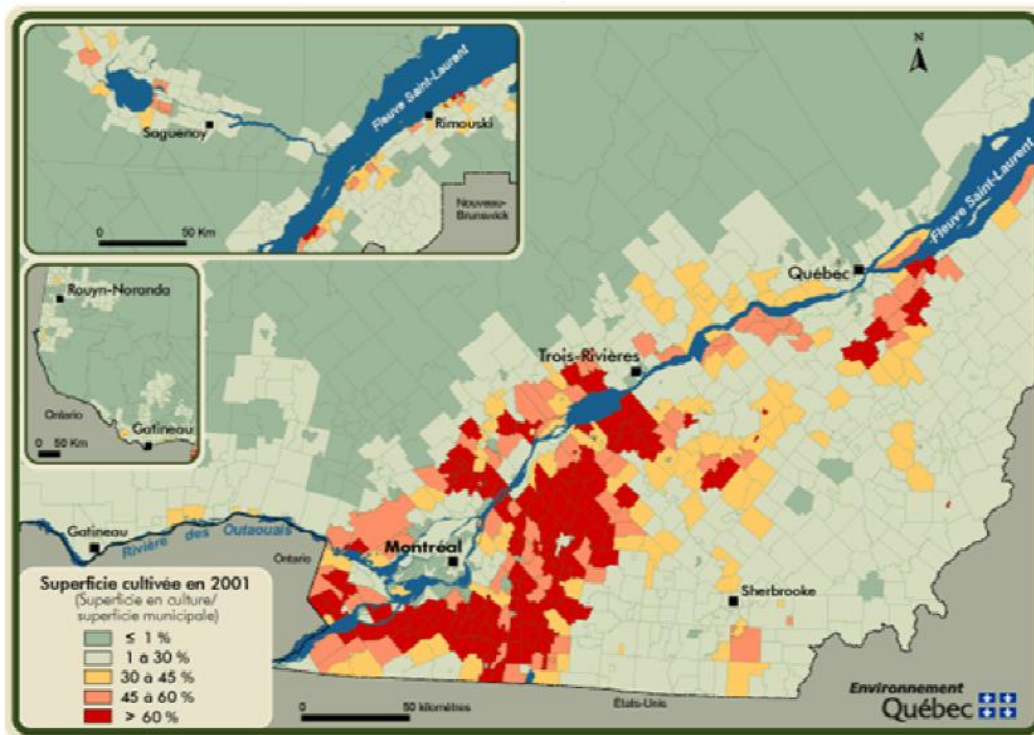
Tiré de Dufour *et al.*, 2009.



ANNEXE 12

SUPERFICIE EN CULTURE ET ENGRAIS UTILISÉS AU QUÉBEC

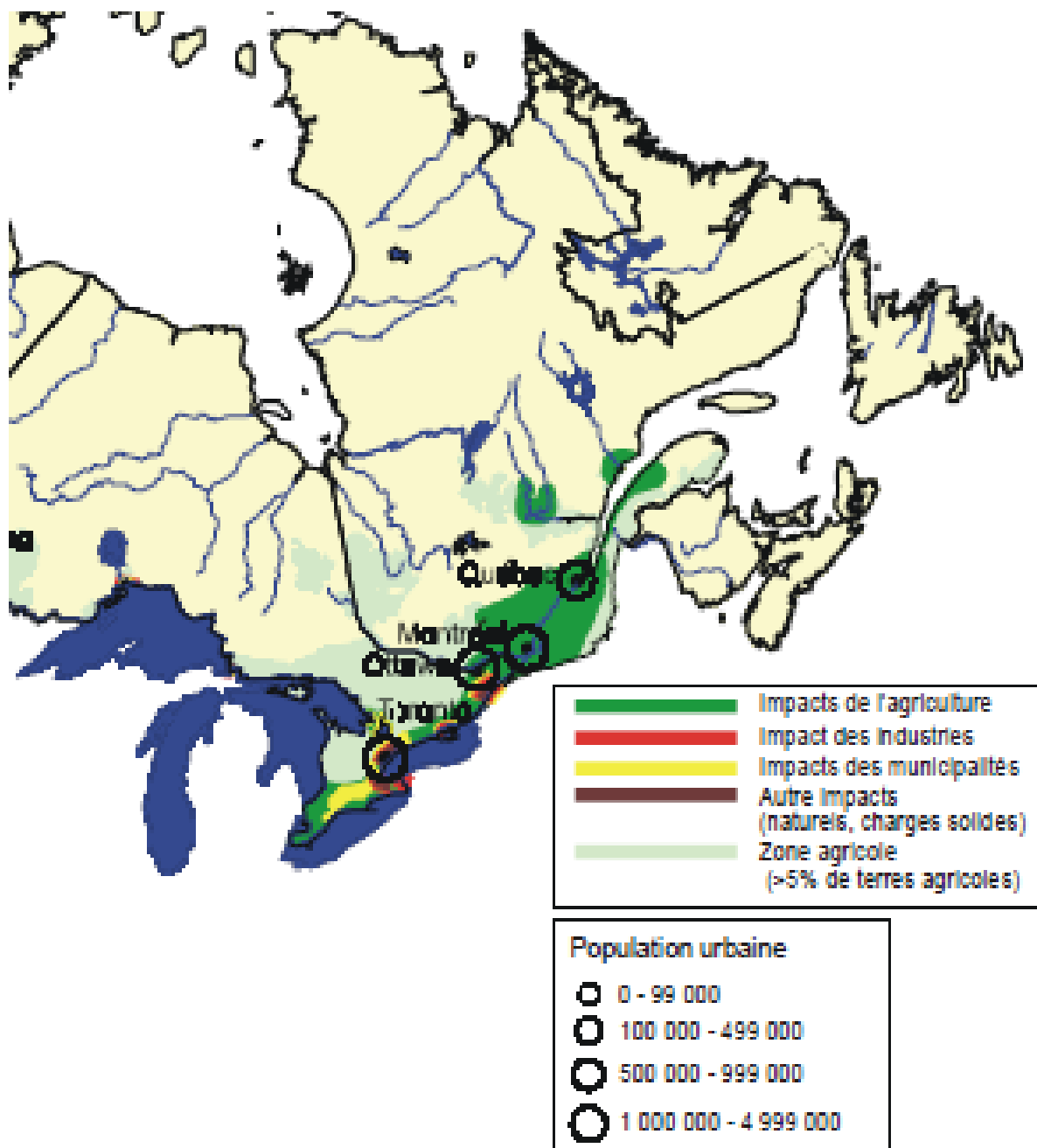
Tiré de MDDEP, 2004.



ANNEXE 13

LIEUX D'ENRICHISSEMENT EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS

Modifié de Chambers *et al.*, 2001.



ANNEXE 14

DENSITÉ HUMAINE AU QUÉBEC

Tiré de MDDEP, 2004.

